

*В. М. Соловьев<sup>1</sup>✉, В. С. Селезнев<sup>2</sup>, А. Ф. Еманов<sup>1</sup>, А. А. Еманов<sup>1</sup>,  
С. А. Елагин<sup>1</sup>, А. Е. Шенмайер<sup>1</sup>*

## **О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины**

<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.sbras.ru

**Аннотация.** Приведены результаты исследований характеристик излучения 40-тонного вибратора на Быстровском полигоне в разные временные периоды. Показана изменчивость излучаемого сигнала в ближней и дальней зоне вибратора до третьей декады июня. Представлены результаты трехлетних 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. Установлено небольшое уменьшение времен пробега на с/ст «Елбаши» вблизи разреза Колыванский, что связывается с деструкцией среды в период произошедших здесь техногенных землетрясений с магнитудами 4.7 (27.11.2023) и 4.4 (17.03.2024) в осадочном чехле. Обоснованы дальнейшие эксперименты по активному мониторингу среды земной коры Горловского угольного бассейна.

**Ключевые слова:** вибратор ЦВ-40, вибромониторинг, коррелограммы, техногенные землетрясения, ряды наблюдений

*V. M. Solovyev<sup>1</sup>✉, V. S. Seleznev<sup>2</sup>, A. F. Emanov<sup>1</sup>, A. A. Emanov<sup>1</sup>, S. A. Elagin<sup>1</sup>, A. E. Shenmayer<sup>1</sup>*

## **On the duration of seasonal environmental changes under a powerful vibration source and vibration monitoring of coal mining sections of the Gorlovka depression**

<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.sbras.ru

**Abstract.** The results of investigations of the radiation characteristics of a 40-ton vibrator at the Bystrovsky polygon in different periods of time are presented. The variability of the radiated signal in the near and far zones of the vibrator up to the third decade of June is shown. The results of three-year planned vibroseismic X-ray radiographs with a 40-ton vibrator of the Earth's crust in the north-eastern part of the Gorlovskaya Depression with large coal mines Kolyvansky and Vostochny are presented. Examples of correlograms and plots of travel times of longitudinal waves at seismic stations are given. The insignificant decrease of travel times at the Elbashinsky section near Kolyvansky is found, which is connected with destruction of the environment during man-made earthquakes with magnitudes 4.7 (27.11.2023) and 4.4 (17.03.2024) in the sedimentary cover. Further experiments on active monitoring of the state of the Earth's crust in the Gorlovka coal basin were justified.

**Keywords:** CV-40 vibrator, vibration monitoring, correlograms, anthropogenic earthquakes, observation series

## ***Введение***

На Быстровском вибросейсмическом полигоне в течение нескольких десятилетий рядом организаций РАН и СО РАН проводятся испытания искусственных управляемых источников сейсмических волн, предназначенных для исследования внутренних оболочек Земли, проведения экспериментальных исследований по ряду фундаментальных проблем геофизики (таких как исследование напряженного и метастабильного состояний твердой среды), разработки и опробования новых методик выявления предвестников опасных сейсмических событий, изучения нелинейных взаимодействий геофизических полей разной природы и др. Во многих из упомянутых направлений за годы существования полигона получены результаты мирового уровня; ряд разработок успешно внедрен в производство [1, 2, 3].

### ***О влиянии сезонных изменений среды под виброисточниками на регистрируемые волновые поля в «ближней» и «дальней» зонах***

Уже в первых экспериментах с 100-тонным вибратором на Быстровском полигоне, наряду с высокой стабильностью и повторяемостью вибрационных воздействий, была установлена сезонная изменчивость волновых полей от вибратора в ближней и дальней зонах, связанная с изменением на порядок характеристик грунта под вибратором [3, 4]. Было отмечено изменение волновых полей в зимний период, начиная примерно с начала ноября по конец марта; резкий спад амплитуд излучения начинается с первых чисел ноября, минимум наблюдается в середине марта, а максимум излучения – с середины мая по конец октября. Было установлено, что по типу спектра излучения можно выделить зимнее излучение и летнее излучение с переходными периодами между ними, а также, что процесс смены типа излучения циклический с высокой степенью равенства однотипных характеристик излучения разных лет друг другу. Характерным признаком отличия зимних коррелограмм от летних для 40-тонного виброисточника (кроме самих величин амплитуд, меняющихся на порядок [5]) является практическое отсутствие в зимний период полукратных, полуторократных, 2.5-кратных... гармоник (рис. 1).

По данным экспериментов 2016 - 2018 гг. с использованием специального температурного датчика под вибратором на разных глубинах установлено, что стабильное (по амплитуде) излучение сохраняется в течение 4-х летне-осенних месяцев и короткий период зимой в феврале-марте [4]. В конце марта и апреле и в переходный осенне-зимний период отмечается сильный разброс амплитуд [6].

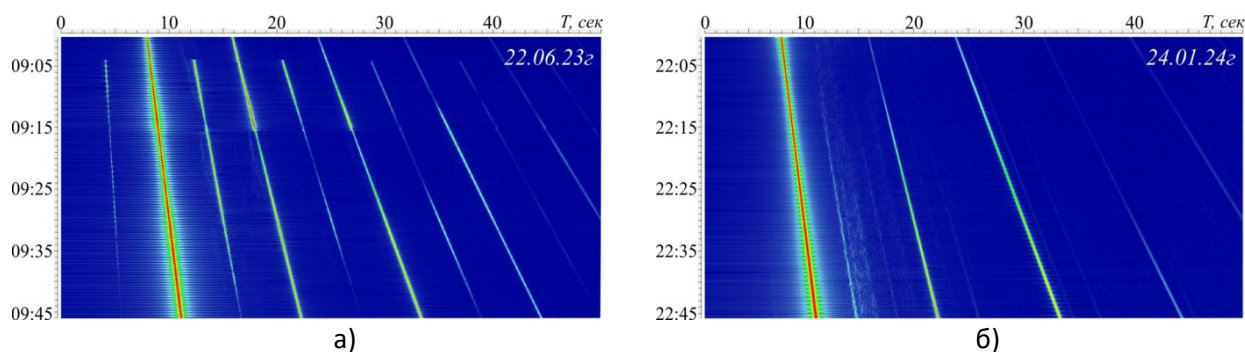


Рис. 1. Примеры текущих спектров в ближней зоне вибратора ЦВ-40 в летний (22 июня 2023 г.) (А) и в зимний (24 января 2024 г.) (Б) периоды

В 2022 году после технического ремонта и перестановки виброисточника ЦВ-40 был повторен ряд экспериментов по изучению резонансов в системе вибратор/грунт и повторяемости вибросеансов. Ниже (на рис. 2) представлен пример экспериментов с накоплением вибрационных сеансов, казалось бы, в относительно стабильный летний период на площадке Быстровского полигона.

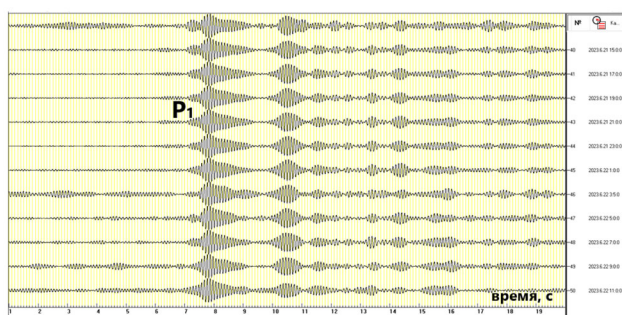


Рис. 2. Примеры коррелограмм (с нормировкой на каждой трассе) от вибратора ЦВ-40, зарегистрированные на с/ст Новосибирск при повторных сеансах излучения 21-22 июня 2023 года

Было выполнено 12 сеансов излучения вибратора ЦВ-40 (с интервалом в 2 часа) в частотном диапазоне 7.91-11.23 Гц на средних дебалансах с 13-00 (Гринвич) 21 июня 2023 года по 11-00 22 июня 2023 года.

Получены достаточно стабильные повторные коррелограммы. Однако при рассмотрении значений максимумов амплитуд излучения продольной волны  $P_1$  ( $T \sim 7.6-7.9$  с) были отмечены незначительные изменения в начальный и средний период мониторинга и достаточно сильные в конце (рис. 3). Небольшие скачки амплитуд, вплоть по десятый сеанс (рис. 3), согласуются с ранее проведенными экспериментами, при которых уменьшение амплитуд при повторных сеансах обусловлено выдавливанием небольшого количества воды под вибратором при его работе; при этом происходит уменьшение скоростей упругих волн под вибратором и понижение резонанса излучения в низкочастотную область [5, 7], расширяя эффективный диапазон излучения.

Небольшой перерыв в работе вибратора приводит к первоначальному состоянию (виду виброграммы и текущих спектров), что можно трактовать как восстановление структуры среды.

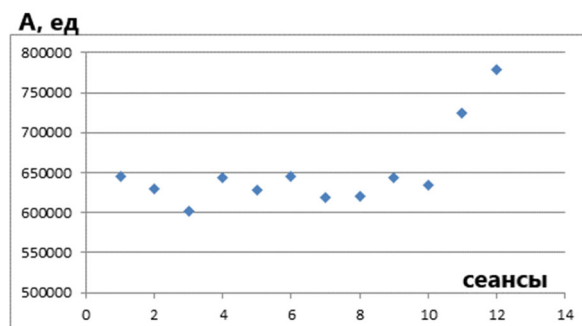


Рис. 3. График максимальных амплитуд продольной волны  $P_1$  при суточном мониторинге 21-22 июня 2023 года

Этим объясняются незначительные флуктуации амплитуды на графике (рис. 3). Резкий же скачок амплитуд, более чем на 20% (рис. 3), объяснить этим невозможно. Прояснить ситуацию помогает анализ графиков промерзания и оттаивания грунта под вибратором, полученных ранее (в 2016-2017 гг.) с температурным датчиком на глубинах до 5м [4]. Из него следует, что с апреля по июнь грунт под вибратором переходит из твердо-мерзлого состояния в пластично-мерзлое и уже далее в нормальное не мерзлое состояние. В конце мая начале июня (в среднем за разные годы) этот процесс затрагивает большие глубины в 1.5-2 м.

Можно предположить, что этот процесс в результате большого количества вибросеансов в течение дня в июньском эксперименте 2023 года был ускорен большим поступлением тепла под вибратор [8] и привел к полному оттаиванию грунта и включению в резонанс более толстого слоя под вибратором; это, соответственно, и привело к сильному повышению амплитуд излучения после 10-го сеанса. При этом существенно расширился частотный диапазон излучения виброисточника в ближней зоне и наблюдалось появление полукратной и полуторакратных гармоник практически сразу после включения вибратора.

Результаты проведенного эксперимента наглядно иллюстрируют высокую чувствительность вибросейсмического метода к изменениям в среде, это, во-первых; а во-вторых – диктуют необходимость учета изменений в среде под вибратором при анализе волновых полей в дальней зоне при вибромониторинге.

### ***Вибромониторинг угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине***

В 2022-2024 гг. были продолжены также начатые ранее исследования по режимным вибросейсмическим просвечиваниям участков крупных угледобывающих разрезов Восточный и Колыванский. Регистрация виброисточника ЦВ-40 осуществлялась на сети временных сейсмостанций («Елбаши» (KLV01) и «Усть-Чем» (KLV02)) в районе разрезов и опорной сейсмостанции Новосибирск (NVS) (рис. 4).

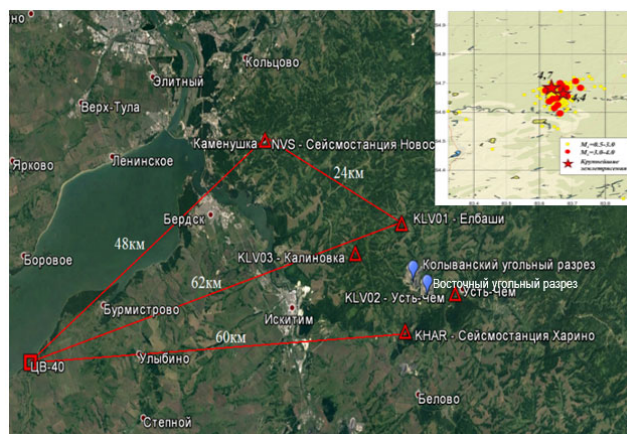


Рис. 4. Схема режимных вибросейсмических исследований в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный. На врезке – эпицентры землетрясений в районе Горловской впадины в 2022-2024 гг.

Для исключения сезонных изменений в районе виброисточника при мониторинге анализируется разность времен прихода двух волн, например,  $P_1$  и  $S$ -волн на одной коррелограмме, как это показано в [2, 6, 9], либо двух продольных волн, регистрируемых от вибратора на разных станциях. Для мониторинга северо-западного участка Горловской впадины с коррелограмм на станции «KLV01» снимались времена волны  $P_2$  (предположительно продольной отраженной волны от неглубоко залегающей границы в верхней части коры), как наиболее четко выраженной на коррелограммах по сравнению с первыми вступлениями (рис. 5).

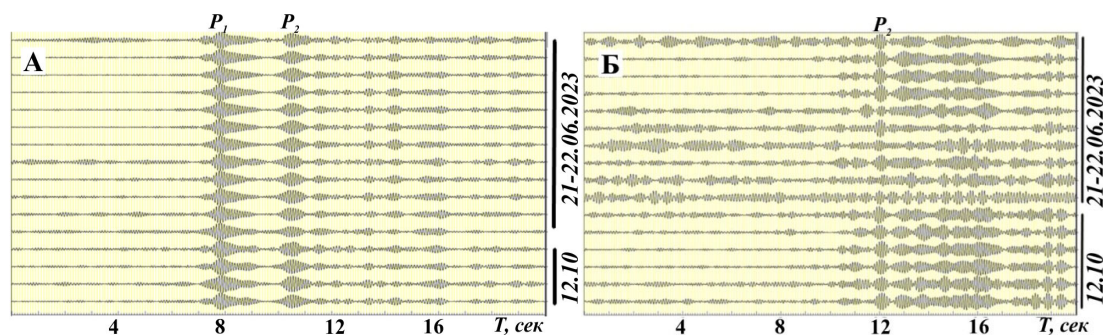


Рис. 5. Примеры записей от вибратора ЦВ-40 на с/ст. NVS (А) и KLV01 (Б)

Разброс разности времен регистрации максимумов волны  $P_2$  со с/ст «KLV01» и  $P_1$  с опорной сейсмостанции «NVS» (рис. 5) составляет в 2022-2024 гг. примерно 0.011 с (за исключением пары точек) при среднем значении  $\sim 4.228$  с (рис. 6А). На полученном графике разности времен отмечается небольшое уменьшение разности времен в 2022-2023 гг., а затем увеличение. С одной стороны, выявленные отклонения не являются значимыми, поскольку находятся в пределах точности измерений в 0.003-0.005 с. Тем не менее, проведено сравнение



полученных данных графика разности времен с данными графика разности по другим станциям и материалами сейсмологических наблюдений на исследуемой площади.

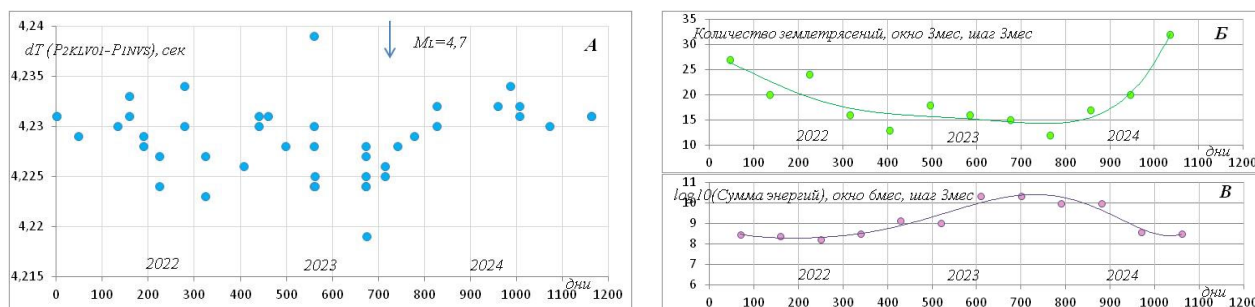


Рис. 6. Графики разности времен пробега волн на с/ст. «KLV01» и «NVS» в 2022-2024 гг. (А), количества (Б) и суммарной энергии (В) землетрясений в районе угольных разрезов Колыванский и Восточный

Подобный тренд уменьшения разности времен отсутствует на графике с с/ст. SLR (в стороне от площади угольных разрезов) и опорной с/ст. NVS, что подтверждает обособленность данных на рис. 6А.

За период мониторинга с 2022 по 2024 гг. на исследуемой площади АСФ ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано свыше 230 землетрясений с магнитудами  $M$  от 0.5 до 4.7. Наиболее крупное событие с  $M = 4.7$  произошло 27.11.2023 года в северном окончании Колыванского разреза; на рис. 6А оно отмечено как раз в самой области понижения разности времен.

Проанализированы также графики количества и энергии землетрясений за исследуемый период. Как видно из графика на рис. 6Б с 2022 года по конец 2023 года (и начало 2024) происходит уменьшение количества землетрясений (осредненное за трехмесячный период) от 26 до 12, а потом резкое возрастание до 20-32 (в конце 2024 года). Фактическое понижение разности времен на рис. 6А практически совпадает с значительным понижением количества событий на рис. 6Б. К данному минимуму на рис. 6А и 6Б приурочен также максимум выделенной энергии ( $Lg E$ ) (рис. 6В). Можно предположить, что при сильном увеличении угольных разработок произошло уплотнение пород и накопление потенциальной энергии, которое привело к разрядке в виде крупного события с  $M=4.7$ .

С большей вероятностью выявленная корреляция не случайна; понижение графика разности времен может говорить об увеличении скорости продольных волн в пределах окрестности с/ст KLV 01, которое произошло под воздействием уплотнения пород.

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 [10-13].

С использованием мировой зависимости из [12] о размерах очага землетрясения в зависимости от магнитуды было установлено, что размеры большинства очагов техногенных землетрясений Горловской впадины с магнитудами до 4.5-4.7 могут составлять около 5 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.) [10-13]. 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 рис. 6А за 2022-2024 гг., равное 0.0027 с), что составляет чуть более 0.005 с.

Обзор немногочисленной литературы по сейсмическим предвестникам землетрясений показал, что 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. Это в пять раз больше значимых вариаций параметра разности времен пробега продольных волн, которые могут быть установлены при режимных вибросейсмических наблюдениях в Горловской впадине. Если рис. 6А действительно отражает процесс подготовки и развития техногенных землетрясений в пределах разрабатываемых разрезов, то малость выявленных вариаций может объясняться как отклонением трассы мониторинга (вибратор ЦВ-40 – с/ст Елбаши) от активизированной среды (до 4-7 км), так и тем обстоятельством, что техногенно-природные землетрясения происходят в осадочном чехле с повышенным затуханием, а не в кристаллических породах, для которых получены немногочисленные ссылки о вариациях времен пробега перед землетрясениями [10, 11, 13].

### ***Заключение***

По результатам круглогодичных экспериментов в ближней и дальней зоне виброисточника показано, что сезонные изменения волновых полей могут продолжаться до конца июня; это диктует необходимость учета изменений в среде под вибратором при анализе волновых полей в дальней зоне при вибромониторинге.

По результатам режимных вибросейсмических наблюдений в районе разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине выявлены вариации разности времен регистрации продольных волн на с/ст «Елбаши» (KLV01) и опорной с/ст Новосибирск (NVS), выражающиеся в закономерном уменьшении разности времен примерно на 0.005-0.007 с в конце 2023 года и начале 2024 года; для этого периода отмечено также уменьшение примерно в 2 раза количества зарегистрированных землетрясений и повышение суммарной энергии. В качестве согласования выявленных зависимостей высказано 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. Уменьшение количества землетрясений (или

сейсмическое затишье) перед крупными землетрясениями неоднократно отмечалось специалистами в разных регионах.

### ***Благодарности***

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) 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., Еманов А.Ф. и др. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. – М: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. – 470 с.
2. 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.
3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. и др. 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. 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, 2017. – Т.2. – №4. – С. 34-39.
5. Соловьев В.М., Кашун В.Н., Романенко И.Е. и др. Особенности излучения мощных вибраторов на неоднородных грунтах и некоторые технологические приемы повышения эффективности излучения при глубинных сейсмических исследованиях и активном мониторинге среды // Проблемы информатики. – 2016. – №1. – С. 58-72.
6. 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. – С. 349-356.
7. Геза Н.И., Егоров Г.В., Юшин В.И. Особенности напряженного состояния рыхлой среды, подвергаемой пульсирующей нагрузке. Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», изд. ИГД СО РАН, 2004. – С. 340-347.
8. Юшин В.И., Аюнов Д.Е., Дучков А.Д. Мониторинг изменения температуры под плитой действующего сейсмического вибратора. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 2. – С. 32-36.
9. Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Елагин С.А., Галёва Н.А. Развитие сети активного мониторинга в сейсмоактивном Алтае-Саянском регионе. – Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 46-55.
10. 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.
11. Моги К. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1988. – 373 с.
12. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М: Наука, 1985. – 408 с.
13. Садовский М.А., Нерсесов И.Л. Вопросы прогноза землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 9. – С. 13-30.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов,  
А. А. Еманов, С. А. Елагин, А. Е. Шенмайер, 2025