

**VIBROSEISMIC INVESTIGATIONS OF THE BAIKAL RIFT ZONE WITH A POWERFUL CVO-100 VIBRATOR**V.V. Kovalevsky ¹✉, A.L. Sobisevich ², Ts.A. Tubanov ^{3,4}, L.P. Braginskaya ¹, A.P. Grigoryuk ¹

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Academician Lavrentiev Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

³ Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

⁴ Buryat Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

ABSTRACT. The article provides an overview of vibroseismic studies carried out in the Baikal rift zone using Large-Scale Research Facilities – a powerful CVO-100 seismic vibrator, installed at the South Baikal geodynamic test site SB RAS. Research is carried out according to several methods focused on different tasks: study of the structure of the Earth's crust and upper mantle in the BRZ, active vibroseismic monitoring, and verification of velocity models of the Earth's crust. To study the structure of the Earth's crust and the upper mantle, there were done the vibrator-generated wavefield recordings at the stationary regional network of seismic stations in the Buryat and Baikal branches of the Federal Research Center of the GS RAS, as well as the experimental studies involving the mobile networks deployment (ICMMG SB RAS, SIPE RAS, GIN SB RAS). The aim of the work is to carry out deep vibroseismic sounding of the Earth's crust (vibro-DSS) at the junction of the Siberian platform, the BRZ and the Sayan-Baikal folded area. The methodology is based on the study of vibration seismograms with the determination of arrival times of the main groups of waves and their correlation with the velocity models of the Earth's crust in the BRZ. A CVO-100 vibrator and a regional network of seismic stations are used to carry out active vibroseismic monitoring of the southern part of the BRZ. The active monitoring area is about 500×200 km. During vibroseismic monitoring, there were done thorough studies of seasonal variations of the vibrator-generated wavefield and the development of techniques for spectral correction of seismograms. A seismic vibrator CVO-100 was used to carry out experimental verification of the velocity models of the Earth's crust, developed based on the BEST and PASSCAL experimental data. The vibrational deep seismic sounding (vibro-DSS) on the Baikal – Ulan Bator profile was carried out by the ICMMG SB RAS, GIN SB RAS and BB FRC GS RAS (Russia) in cooperation with IAG MAN (Mongolia).

KEYWORDS: vibroseismic studies; Baikal rift zone; vibrator CVO-100; wave field; monitoring

FUNDING: The work was done as part of state assignments of ICMMG SB RAS (0251-2022-0004), IPHE RAS (0144-2019-0019) and BB FRC GS RAS (075-01471-22).

SHORT COMMUNICATION

Received: December 8, 2021

Revised: February 3, 2022

Accepted: February 16, 2022

Correspondence: Valeriy V. Kovalevsky, kovalevsky@sscc.ru

FOR CITATION: Kovalevsky V.V., Sobisevich A.L., Tubanov Ts.A., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., 2022. Vibroseismic Investigations of the Baikal Rift Zone with a Powerful CVO-100 Vibrator. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0589. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0589

ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ С МОЩНЫМ ВИБРАТОРОМ ЦВО-100

В.В. Ковалевский¹, А.Л. Собисевич², Ц.А. Тубанов^{3,4}, Л.П. Брагинская¹, А.П. Григорюк¹

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

³ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

⁴ Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье приведен обзор вибросейсмических исследований, выполняемых в Байкальской рифтовой зоне с использованием уникальной научной установки – мощного сейсмического вибратора ЦВО-100, установленного на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне СО РАН. Работы проводятся по нескольким методикам, ориентированным на решение различных задач: исследование структуры земной коры и верхней мантии в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), активный вибросейсмический мониторинг, верификацию скоростных моделей земной коры. Для изучения структуры земной коры и верхней мантии проводится регистрация волнового поля вибратора на стационарной региональной сети сейсмостанций Бурятского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также экспериментальные исследования с развертыванием мобильных сейсмических групп (ИВМиМГ СО РАН, ИФЗ РАН, ГИН СО РАН). Целью работ является проведение глубинного вибросейсмического зондирования земной коры (вибро-ГСЗ) в зоне сочленения Сибирской платформы, БРЗ и Саяно-Байкальской складчатой области. Основу методики составляет изучение вибрационных сейсмограмм с определением времен прихода основных групп волн и их увязка со скоростными моделями земной коры в БРЗ. С использованием вибратора ЦВО-100 и региональной сети сейсмических станций проводится активный вибросейсмический мониторинг южной части БРЗ. Область активного мониторинга составляет примерно 500×200 км. При проведении вибросейсмического мониторинга были детально исследованы сезонные вариации волнового поля вибратора и разработаны методики спектральной коррекции сейсмограмм. С использованием сейсмического вибратора ЦВО-100 была выполнена экспериментальная часть работ по верификации скоростных моделей земной коры, построенных по данным экспериментов BEST и PASSCAL. Работы по вибро-ГСЗ на профиле Байкал – Улан-Батор проводились ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН, Бурятским филиалом ФИЦ ЕГС РАН (Россия) совместно с ИАГ МАН (Монголия).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибросейсмические исследования; Байкальская рифтовая зона; вибратор ЦВО-100; волновое поле; мониторинг

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках проектов госзаданий ИВМиМГ СО РАН (№ 0251-2022-0004), ИФЗ РАН (№ 0144-2019-0019) и БуФ ФИЦ ЕГС РАН (№ 075-01471-22).

1. ВВЕДЕНИЕ

Геофизические исследования, проводимые в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), связаны с изучением строения земной коры БРЗ и сопредельных территорий, процессов рифтогенеза и современной геотектоники в самой большой и сейсмически активной рифтовой зоне Евразии. Вибросейсмические исследования в БРЗ были начаты в 90-х годах прошлого века после создания уникальной научной установки – мощного сейсмического вибратора ЦВО-100 на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. Они проводились в кооперации институтов РАН и СО РАН в рамках выполнения научных программ РАН «Вибрационное просвещение Земли (ВПЗ)» и «Глобальные изменения природной среды и климата», интеграционных проектов СО РАН, международных и российских научных грантов [Goldin et al., 2001; Tcibulchik, 2004]. Южно-Байкальский геодинамический полигон с вибратором ЦВО-100 выполняет роль центра коллективного пользования,

на базе которого в настоящее время выполняют вибросейсмические исследования Байкальской рифтовой зоны ИФЗ РАН, ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН, ИЗК СО РАН, ИНГГ СО РАН, ИСЗФ СО РАН и Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН.

2. СЕЙСМИЧЕСКИЙ ВИБРАТОР ЦВО-100 – УНИКАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ УСТАНОВКА ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Сейсмический вибратор ЦВО-100, установленный на Южно-Байкальском полигоне возле п. Бабушкин, развивает вибрационные усилия на грунт 100 т в диапазоне частот 5–12 Гц (рис. 1). Возбудителем колебаний является дебалансный механизм с приводом от электродвигателей. Вибратор имеет массивный корпус с общей массой более 100 т, связанный с грунтом специальными анкерами. Механическая система вибратор – грунт обладает резонансными свойствами и позволяет

эффективно излучать вибросейсмические сигналы вблизи резонансной частоты колебаний 6–8 Гц.

Вибратор ЦВО-100 может работать в двух режимах: режиме излучения свип-сигналов с линейно изменяющейся частотой по времени и в режиме излучения гармонических сигналов с постоянными частотами. В работах по вибро-ГСЗ и вибросейсмическому мониторингу используются вибрационные свип-сигналы длительностью 3264 с, линейная развертка частоты от 6.25 до 10.05 Гц. Вибратор имеет компьютерную систему управления с высокостабильными кварцевым задающим генератором излучаемого сигнала и системой обратной связи с электроприводом установки. Излученные свип-сигналы вибратора характеризуются высокой стабильностью и повторяемостью, что позволяет выполнять многолетние наблюдения вибросейсмических полей в БРЗ.

3. ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВИБРАТОРА ЦВО-100, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Вибросейсмические исследования в Байкальской рифтовой зоне с использованием в качестве источника сейсмических волн мощного 100-тонного сейсмического вибратора ЦВО-100 проводятся по нескольким методикам, ориентированным на решение различных задач: исследование структуры земной коры и верхней мантии в БРЗ, активный вибросейсмический мониторинг, верификацию скоростных моделей земной коры.

Для исследования структуры земной коры и верхней мантии проводится регистрация волнового поля

вибратора на стационарной региональной сети сейсмостанций Бурятского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН [Tat'kov et al., 2013]. Также проводятся экспериментальные исследования с развертыванием мобильных сейсмических групп [Kovalevsky et al., 2017] (ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН 2010–2014 гг.). Целью работ является проведение глубинного вибросейсмического зондирования земной коры (вибро-ГСЗ) в зоне сочленения Сибирской платформы, БРЗ и Саяно-Байкальской складчатой области [Seleznev et al., 2018]. Основу методики составляет изучение вибрационных сейсмограмм с определением времен прихода основных групп волн и их увязка со скоростными моделями земной коры в БРЗ.

Выполнены эксперименты по комплексной регистрации волнового поля вибратора ЦВО-100 на суше и на льду Байкала с использованием сейсмометров и донной станции и в воде с помощью гидрофонов (ИФЗ РАН, ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН, ИЗК СО РАН 2020, 2021 гг.). На полученных сейсмограммах выделяются сейсмические волны, проходящие по кристаллическому фундаменту, по осадочным отложениям, а также в водной толще Байкала [Sobisevich et al., 2021]. Зарегистрированы акустические волны, генерируемые при работе вибратора и распространяющиеся в приповерхностном звуковом канале над льдом Байкала на расстоянии 85 км.

Исследованы эффекты сейсмоионосферного взаимодействия на основе влияния сейсмических колебаний, возникающих при работе мощного вибратора, на состояние ионосферы (ИСЗФ СО РАН, ГИН СО РАН, 2014 г.). Исследования показали, что основными механизмами

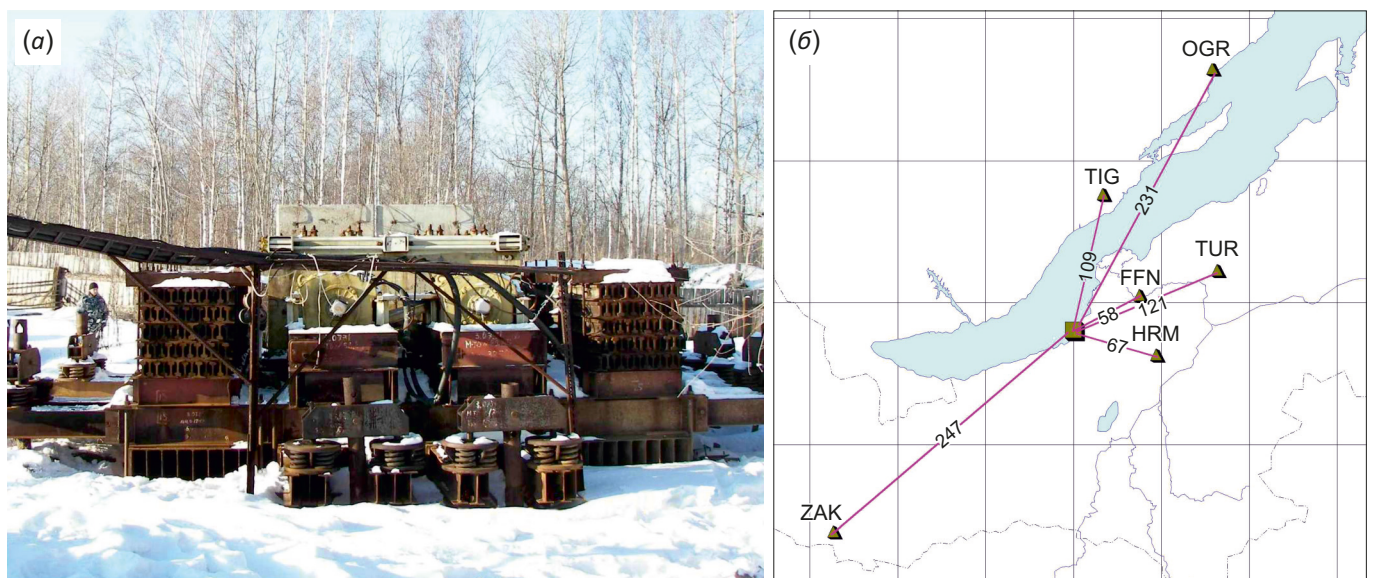


Рис. 1. Вибристочник ЦВО-100 на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне (а) и схема вибросейсмического мониторинга БРЗ (б). Треугольники – сейсмические станции региональной сети, квадрат – вибратор ЦВО-100. Цифрами указаны расстояния от вибратора до сейсмостанций.

Fig. 1. A CVO-100 vibration source at the South Baikal geodynamic test site (a) and a scheme of vibroseismic monitoring of the BRZ (b). Triangles are seismic stations of the regional network, a square is a CVO-100 vibrator. The numbers indicate the vibrator-to- seismic station distances.

формирования геофизических возмущений в ионосфере можно считать генерацию акустических волн, распространяющихся от вибратора [Berngardt et al., 2014].

С использованием вибратора ЦВО-100 и региональной сети сейсмических станций проводится активный вибросейсмический мониторинг южной части БРЗ (рис. 1). Площадь области активного мониторинга составляет примерно 500×200 км. Регулярное вибросейсмическое просвечивание геологической среды многократно повторяющимися идентичными сигналами вибратора позволяет с большой точностью определить параметры волнового поля (скоростные, амплитудно-частотные) и обнаружить слабые вариации волнового поля, вызванные геодинамическими процессами [Yushin et al., 1994].

При проведении вибросейсмического мониторинга были детально исследованы сезонные вариации волнового поля вибратора и разработаны методики спектральной коррекции сейсмограмм. С 2003 г. проводятся сеансы излучения вибратором свип-сигналов и гармонических сигналов с регистрацией на сеймостанциях Тырган (TIG, 106 км от источника) и Хурамша (HRM, 67 км от источника). Это позволило сравнить изменения характеристик волнового поля на трассе, пересекающей Байкал, и трассе через хребет Хамар-Дабан.

Выделен временной тренд малых вариаций разности времен прихода P- и S-волн, составляющий порядка 2 мс/год.

С использованием сейсмического вибратора ЦВО-100 была выполнена экспериментальная часть работ по верификации скоростных моделей земной коры, построенных по данным экспериментов BEST и PASSCAL [Nielsen, Thybo, 2009; Mordvinova, Artemyev, 2010]. Работы по вибрационному глубинному сейсмическому зондированию (вибро-ГСЗ) на профиле Байкал – Улан-Батор проводились ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН, Бурятским филиалом ФИЦ ЕГС РАН (Россия) совместно с ИАГ МАН (Монголия).

Методика верификации основывалась на сравнении теоретических сейсмограмм для двух скоростных моделей земной коры и данных о временах вступлений P-волн на экспериментальных вибрационных сейсмограммах на 400-километровом участке профиля Байкал – Улан-Батор [Kovalevsky et al., 2016, 2017, 2019]. Экспериментальные вибрационные сейсмограммы были получены при регистрации вибрационных свип-сигналов на профиле от 65 до 500 км от источника ЦВО-100 с расстоянием между точками регистрации от 20 до 50 км и применением малых сейсмических групп (антенн). Сравнение теоретических сейсмограмм для скоростных моделей земной коры экспериментов

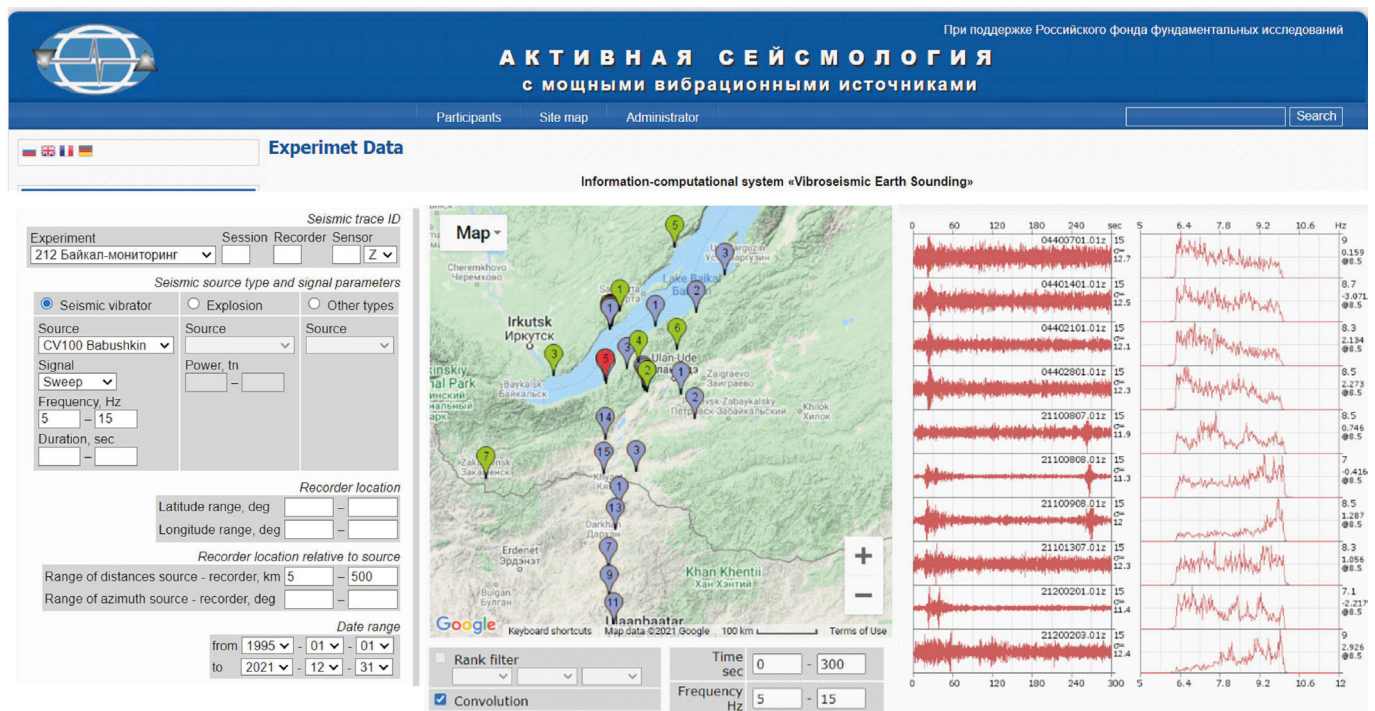


Рис. 2. Страница научной информационной системы (НИС) «Активная сейсмология» с результатом запроса на построение карты экспериментов по вибросейсмическому мониторингу БРЗ и вычислительный анализ отобранных пользователем сейсмограмм. На карте пункты мобильной регистрации обозначены синими пиктограммами, региональные сейсмические станции – зелеными, вибрационный источник – красной. В правой части – вибрационные сейсмограммы и их спектры.

Fig. 2. The scientific information system "Active seismology" page with the result of a query about mapping experiments on vibroseismic monitoring of the BRZ and a computational analysis of seismograms selected by the user. On the map, mobile recording sites are marked with blue pictograms, regional seismic stations – with green, and the vibration source – with red. On the right side there are vibration seismograms and their spectra.

BEST и PASSCAL с данными о временах вступлений Р-волн на экспериментальных вибрационных сейсмограммах на 400-километровом участке профиля Байкал – Улан-Батор позволило оценить степень соответствия скоростных моделей друг другу и, в частности, не подтвердило предполагаемого в модели эксперимента BEST наличия в нижней коре слоя с повышенными скоростями продольных волн.

4. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ БРЗ – НИС «АКТИВНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ»

Результаты вибросейсмических исследований в БРЗ доступны в интернете по адресу <http://opg.sssc.ru>. Они представлены в НИС «Активная сейсмология», разработанной в ИВМиМГ с целью систематизации и структуризации информационных ресурсов по вибро-ГСЗ и вибросейсмическому мониторингу (рис. 2). В НИС интегрированы базы данных полевых и вычислительных экспериментов, синтетических сейсмограмм и снимков волновых полей, которые являются результатами математического моделирования с использованием высокопроизводительных кластеров Сибирского суперкомпьютерного центра. Обеспечивается содержательный поиск, визуализация и интерактивный on-line анализ (корреляционный, спектральный, спектрально-временной и т.д.) найденных сейсмотрасс, а также построение интерактивных карт и экспериментальных работ с отображением результатов непосредственно в веб-браузере пользователя. Кроме того, в НИС представлена систематизированная информация о научных организациях и персонах, развивающих методы активной сейсмологии, о публикациях, содержащих результаты исследований в предметной области, справочная и иная информация, необходимая для интерпретации данных вибросейсмического мониторинга [Braginskaya et al., 2015, 2021].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вибросейсмические исследования, выполняемые в Байкальской рифтовой зоне с использованием уникальной научной установки – мощного сейсмического вибратора ЦВО-100, установленного на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне СО РАН, являются современным направлением экспериментальной геофизики. В числе мировых трендов в спектре исследований сейсмичности и иных проявлений современной геодинамики выделяются комплексные исследования геофизических полей с применением методов активного вибросейсмического мониторинга. Активно развивается данное научное направление в Японии. В качестве сейсмического источника используется Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACROSS), которая генерирует сейсмический сигнал с вращением эксцентрикового ротора, точно синхронизируемого с часами GPS. С помощью установки ACROSS за 15-месячный период наблюдений были обнаружены изменения сейсмических скоростей в коре, вызванные землетрясением

в районе Токай (Япония). Российские исследования по активной сейсмологии проводятся в БРЗ с наиболее мощным сейсмическим вибратором ЦВО-100 и лидируют в мире по значительно превосходящей дальности регистрации вибросейсмических сигналов и площади района вибросейсмического мониторинга.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались данные, полученные в Байкальском и Бурятском филиалах ФИЦ ЕГС РАН, а также на уникальных научных установках «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» и «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов», входящих в состав ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Berngardt O.I., Demianov M.O., Edemsky I.K., Mikhalev A.V., Mylnikova A.A., Predein P.A., Tatkov G.I., Tubanov C.A., Yasyukovich Yu.V., 2014. First Experiments on Studying the Condition of the Atmosphere and of the Ionosphere in the Baikal Region within Nighttime during the Seismic Vibrator Operation. Proceedings of XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium (August 16–23, 2014, Beijing, China). IEEE, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929811>.

Braginskaya L.P., Grigoruk A.P., Kovalevsky V.V., 2015. Scientific Information System "Active Seismology" for Integrated Geophysical Studies. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences 25 (1), 94–98 (in Russian) [Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В. Научная информационная система «Активная сейсмология» для комплексных геофизических исследований // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 20157. Вып. 25. № 1. С. 94–98].

Braginskaya L.P., Grigoruk A.P., Kovalevsky V.V., 2021. An Integrated Information Environment to Support Geophysical Research of the Baikal Rift Zone. In: Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation (August 24–27, 2021). Novosibirsk, p. 406–413.

Goldin S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskiy Yu.A., 2001. The South Baikal Geodynamic Testing Ground: Strategy of Earthquake Prediction. *Russian Geology and Geophysics* 42 (10), 1484–1496 (in Russian) [Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1484–1496.].

Kovalevsky V.V., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., 2016. An Information Technology of Verification of Earth's Crust Velocity Models. In: *Proceedings of the 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering* (October 3–6, 2016). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Novosibirsk, p. 443–446. <http://dx.doi.org/10.1109/APEIE.2016.7806369>.

Kovalevsky V., Chimed O., Tubanov C., Braginskaya L., Grigoruk A., Fatyanov A., 2017. Vibroseismic Sounding of the Earth's Crust on the Profile Baikal–Ulaanbaatar. In: *Proceedings of the International Conference on Astronomy & Geophysics in Mongolia* (July 20–22, 2017). Ulaanbaatar, Mongolia, p. 261–265.

Kovalevsky V.V., Fatyanov A.G., Karavaev D.A., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Mordvinova V.V., Tubanov C.A., Bazarov A.D., 2019. Research and Verification of the Earth's Crust Velocity Models by Mathematical Simulation and Active Seismology Methods. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 569–583 (in Russian) [Ковалевский В.В., Фатьянов А.Г., Караваев Д.А., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Мордвинова В.В., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. Исследование и верификация скоростных моделей земной коры методами математического моделирования и активной сейсмологии // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 569–583]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0427>.

Mordvinova V.V., Artemyev A.A., 2010. The Three-Dimensional Shear Velocity Structure of Lithosphere in the Southern Baikal Rift System and Its Surroundings. *Russian Geology and Geophysics* 51 (6), 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.05.010>.

Nielsen C., Thybo H., 2009. Lower Crustal Intrusions beneath the Southern Baikal Rift Zone: Evidence from Full-Waveform Modelling of Wide-Angle Seismic Data. *Tectonophysics*

470 (3–4), 298–318. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.023>.

Seleznev V.S., Emanov A.F., Solov'ev V.M., Sal'nikov A.S., Yushin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Galeva N.A., 2018. Active Seismology and DSS with Powerful Vibrators in Siberia. In: *Computational Mathematics and Mathematical Geophysics. Marchuk Scientific Readings. Proceedings of the International Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Academician A.S. Alekseeva* (October 8–12, 2018). Vol. 4. ICMMG SB RAS, Novosibirsk, p. 349–356 (in Russian) [Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Сальников А.С., Юшин В.И., Кашун В.Н., Елагин С.А., Галева Н.А. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири // Вычислительная математика и математическая геофизика. Марчуковские научные чтения: Труды Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика А.С. Алексеева (8–12 октября 2018 г.). Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2018. № 4. С. 349–356].

Sobisevich A.L., Presnov D.A., Tubanov Ts.A., Cheremnykh A.V., Zagorskiy D.L., Kotov A.N., Numalov A.S., 2021. The Baikal Ice-Based Seismoacoustic Experiment. *Doklady Earth Sciences* 496, 76–79. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21010219>.

Tat'kov G.I., Tubanov C.A., Bazarov A.D., Tolochko V.V., Kovalevsky V.V., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., 2013. Vibroseismic Study of the Lithosphere of the Baikal Rift Zone and Adjacent Areas. *National Geology* 3, 16–23 (in Russian) [Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий // Отечественная геология. 2013. № 3. С. 16–23].

Tcibulchik G.M. (Ed.), 2004. *Active Seismology with Powerful Vibrational Sources*. GEO, Novosibirsk, 386 p. (in Russian) [Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: Гео, 2004. 386 с.].

Yushin V.I., Geza N.I., Velinsky V.V., Mishurov V.V., Spersky N.F., Savvinikh V.S., Astafiev V.N., 1994. Vibroseismic Monitoring in the Baikal Region. *Journal of Earthquake Prediction Research* 3, 119–134.