

ИРКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Выпуск 2. 2017 г.

Ответственные редакторы:
академик *И. В. Бычков*,
докт. физ.-мат. наук *А. Л. Казаков*

Иркутск
Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН
2017

УДК 001.5
ББК Ч215
А43

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ ПРИБАЙКАЛЬЯ. Выпуск 2. 2017 г. /
Отв. ред. И. В. Бычков, А. Л. Казаков. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Соча-
вы СО РАН, 2017. – 235 с.

Сборник включает статьи, содержащие результаты научных исследований по про-
ектам, выполняемым в настоящее время в рамках регионального конкурса РФФИ, прово-
димого совместно Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством
Иркутской области.

Авторами работ рассмотрен широкий круг задач из различных областей науки и
технологии, представляющих интерес как для Байкальского региона, так и для российской
и мировой науки. Спектр научных направлений, представленных в сборнике, достаточно
разнообразен и включает в себя вопросы экологии и региональной экономики Приангарья
и Прибайкалья; создания новых химических веществ и лекарственных препаратов; геоло-
гии, биологии, геофизики и сейсмологии; экологически чистого энергоснабжения; меди-
цины. Значительное число проблем исследуется авторами с применением современных
математических и информационных технологий и методов компьютерного моделирова-
ния. Все статьи снабжены подробными аннотациями на английском языке, что делает ре-
зультаты проведенных исследований доступными не только для российских, но и для за-
рубежных читателей.

Сборник предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и ма-
гистрантов, интересующихся вопросами экономического и социального развития терри-
тории, экологии и биологии, химии, наук о Земле.

Рецензенты:

академик *М. И. Кузьмин*,
докт. биол. наук *В. И. Воронин*,
докт. геогр. наук *Ю. В. Рыжов*

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СЕЙСМОГРАММ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И РЕСПУБЛИКЕ САХА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БАЙКАЛЬСКОЙ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Добрынина А. А.^{1,2}, Чечельницкий В. В.³, Саньков В. А.^{1,4}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск

²Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

³Байкальский филиал Федерального исследовательского центра

«Единая геофизическая служба РАН», Иркутск

⁴Иркутский государственный университет, Иркутск

e-mail: dobrynina@crust.irk.ru, chechel@crust.irk.ru, sankov@crust.irk.ru

Аннотация. В 1976–1987 гг. на территории Иркутской области, Забайкальского края (Восточная Сибирь) и Республики Саха (Якутия) с научными и коммерческими целями было произведено 10 мирных ядерных взрывов мощностью от 3,2 до 15 кт. События были записаны региональной сетью станций, локализованной в пределах Байкальского рифта и на прилегающих территориях на расстояниях от 246 до 1407 км. В настоящей работе представлены первые результаты обработки этих сейсмограмм. По данным о временах приходов сейсмических фаз были определены региональные скорости сейсмических волн: $V_{Pn} = 8,25 \pm 0,03$ км/с, $V_{Pg} = 6,12 \pm 0,03$ км/с, $V_{Sn} = 4,57 \pm 0,03$ км/с, $V_{Sg} = 3,58 \pm 0,02$ км/с. Полученные скорости хорошо согласуются с известными данными о скоростном строении Байкальского рифта.

Ключевые слова: ядерный взрыв, сейсмические волны, годограф, скоростное строение, Восточная Сибирь, Республика Саха.

PRELIMINARY RESULTS OF WAVEFORM ANALYSIS OF PEACEFUL NUCLEAR EXPLOSIONS IN EASTERN SIBERIA AND REPUBLIC SAKHA ON THE BASE OF BAIKAL REGIONAL SEISMIC DATA

Dobrynina A. A.^{1,2}, Chechelnitzky V. V.³, Sankov V. A.^{1,4}

¹Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk

²Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude

³Baikal Branch of Federal Research Center of the Geophysical Survey RAS, Irkutsk

⁴Irkytsk State University, Irkutsk

e-mail: dobrynina@crust.irk.ru, chechel@crust.irk.ru, sankov@crust.irk.ru

Abstract. During 1976–1987 in the territory of Irkutsk and Chita area (the Eastern Siberia) and Sakha republic (Yakutia) ten peaceful nuclear explosions were conducted in scientific and commercial applications. The peaceful nuclear explosions have yields in the range of 3.2 to 15 kt. Events were registered regional analog seismic stations located in the Baikal rift system and surroundings at distances from 246 to 1407 km. The paper shows the first results of the treatment of these seismograms. Regional travel time curves for the both crustal and mantle seismic phases (P_n , P_g , S_n and S_g) were constructed using arrival times of nine explosions. Based on these data the regional velocities of seismic waves were determined: $V_{Pn} = 8.25 \pm 0.03$ km/s, $V_{Pg} = 6.12 \pm 0.03$ km/s, $V_{Sn} = 4.57 \pm 0.03$ km/s, $V_{Sg} = 3.58 \pm 0.02$ km/s. The velocities obtained well correlated with the data known on the velocity structure of the Baikal rift system.

Keywords: nuclear explosion, seismic waves, travel time curve, velocity structure, Eastern Siberia, Republic of Sakha.

Введение. В 1976–1987 гг. в бывшем Советском Союзе на территории Иркутской области, Забайкальского края (Восточная Сибирь) и Республики Саха (Якутия) было про-

изведено 10 мирных ядерных взрывов (МЯВ) (рис. 1). Взрывы на территории Иркутской области и Забайкальского края были произведены с научной целью, они вошли в состав сверхдлинных профилей глубинного сейсмического зондирования «Рифт» и «Метеорит» (три взрыва) [1]. Остальные семь взрывов, локализованные на юго-западе Республики Саха, имели коммерческое применение (увеличение добычи нефти, строительство нефтехранилища и пр.) [2]. Мощность взрывов варьировала от 3,2 до 15 кт (1 кт тринитротолуола = $4,184 \cdot 10^{12}$ Дж) [3].

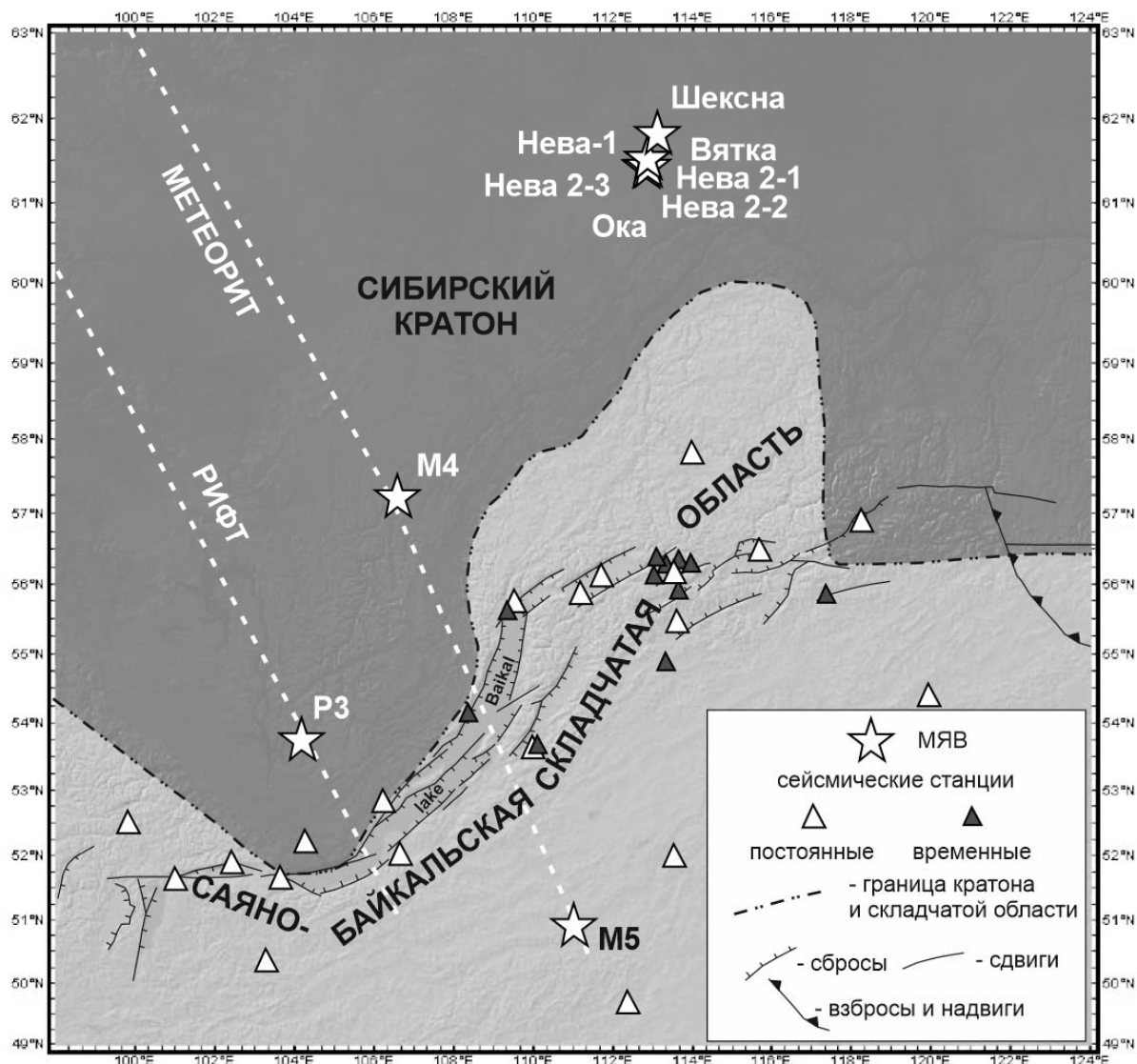


Рис. 1. Исследуемый регион.

Взрывы были зарегистрированы региональной сетью сейсмических станций, локализованной в Байкальском рифте и на прилегающих территориях (международный код ВУ). Известен ряд работ, посвященных исследованию взрывов в Республике Саха («Шексна», «Ока», «Вятка», серия взрывов «Нева») по данным Якутской региональной сети сейсмических станций [2, 4]. Однако до настоящего времени данные Байкальской сети для обработки МЯВ не привлекались. В работе представлены первые предварительные результаты анализа сейсмограмм МЯВов, полученных сетью ВУ.

Исследуемый регион. Структурами первого порядка на территории исследуемого региона являются архей-протерозойский Сибирский кратон и Саяно-Байкальская складчатая область. Кайнозойская Байкальская рифтовая система (БРС) накладывается на обе эти древние структуры (см. рис. 1). Вместе с Алдано-Становой подвижной областью БРС представляет собой активную внутриплитную границу между Евразийской и Амурской

литосферными плитами. Исследования скоростного строения коры и верхней мантии методами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) выявили существование низкоскоростного слоя в верхней коре Байкальского рифта [5]. Согласно данным ГСЗ [5], область с аномально низкой скоростью на поверхности мантии ($V_P = 7,6\text{--}7,8$ км/с, $V_S = 4,3$ км/с) наблюдается на обширной территории под Саяно-Байкальской складчатой областью, под Сибирским кратоном расположена нормальная мантия со скоростями сейсмических волн $V_P = 8,0\text{--}8,1$ км/с, $V_S = 4,55$ км/с. По результатам инверсии невязок времен пробега Р-волн на станциях региональной сети под северо-восточным флангом Байкальского рифта также наблюдается понижение скоростей сейсмических волн, обусловленное тепломассопереносом из-под Сибирского кратона [6].

Согласно ГСЗ [5] и результатам интеграции данных сейсмической томографии [7], толщина земной коры варьируется в пределах 35–42 км под Байкальской впадиной, 43–55 км под горными поднятиями северо-восточного фланга БРС и 36–43 км под Сибирским кратоном.

Данные. В период проведения ядерных взрывов сейсмический мониторинг на исследуемой территории проводился Байкальской опытно-методической сейсмологической экспедицией (в настоящее время – Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»). В 1976–1987 гг. сеть состояла из 20 постоянных и 12 временных аналоговых сейсмических станций (см. рис. 1). Станции сети были оснащены короткопериодной (СКМ, ВГЭК) и длиннопериодной (СКД) аппаратурой. Регистрация сейсмических событий велась в непрерывном режиме с фиксацией на фотобумагу, скорость развертки составляла 1 и 2 мм/с. В рассматриваемый период времени в районе Северо-Муйского тоннеля (трасса БАМ) действовала локальная временная сеть сейсмических станций. Поэтому в районе северо-восточного фланга Байкальского рифта оказалось сосредоточено большинство сейсмических станций – 19 (см. рис. 1). Расстояния от эпицентров МЯВ до сейсмических станций варьируются в пределах 250–1410 км.

Релокализация эпицентров МЯВ. В ряде публикаций, а также на сайте Международного сейсмологического центра приводятся координаты и глубины МЯВ, определенные разными способами: геодезическим [3], сейсмическим (по телесеismicким данным сейсмологических агентств мира), с помощью поиска мест взрывов (шахт) на местности [8], а для МЯВ, входящих в состав сверхдлинных профилей «Рифт» и «Метеорит», также по архивным данным [1]. Для каждого взрыва имеется от 6 до 9 различных определений параметров очага. Координаты эпицентров и глубины, время в очаге, а также магнитуды событий могут очень сильно различаться (различия в координатах могут составлять несколько градусов, а глубины варьируются от 0 до 38,3 км).

Для релокации эпицентров МЯВ использовались скоростные модели, полученные для Сибирского кратона и складчатой области на сверхдлинных профилях «Рифт» и «Метеорит» [1]. Для взрывов на территории Республики Саха релокализация проводилась по данным всех станций сети, а также с учетом времени приходов сейсмических волн только на станции, локализованные на северо-восточном фланге. При расчете глубины гипоцентров фиксировались к глубинам, приведенным в [3]. Для релокации эпицентров МЯВов «Метеорит–4, 5» использовалось 9 и 19 сейсмических фаз, для событий на территории Республики Саха – от 26 до 52 фаз. Результаты расчетов эпицентров взрывов приведены в таблице. Отклонение по времени варьируется в пределах от 0,5 до 5,2 сек., смещение координат эпицентра в отдельных случаях может достигать ~40 км.

Построение региональных годографов. Всего было обработано 190 сейсмограмм, зарегистрированных на расстояниях от 246 до 1407 км, и получено 540 значений времен прихода сейсмических волн: 161 – P_g , 139 – P_n , 108 – S_g и 132 – S_n . Эти значения использовались для построения региональных годографов и определения скоростей сейсмических волн в коре и верхней мантии региона (рис. 2). Согласно полученным данным скорости сейсмических волн в коре составляют $V_{Pn} = 8,25 \pm 0,03$ км/с, $V_{Pg} = 6,12 \pm 0,03$ км/с, $V_{Sn} = 4,57 \pm 0,03$ км/с, $V_{Sg} = 3,58 \pm 0,02$ км/с.

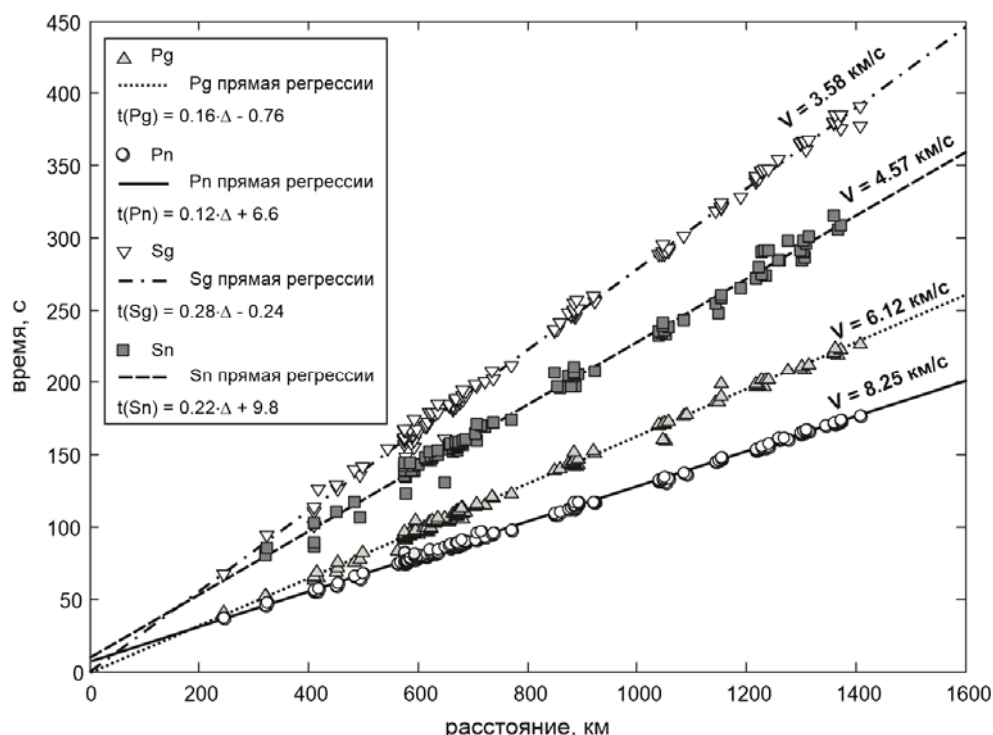


Рис. 2. Годограф региональных фаз сейсмических волн на основе данных МЯВ.

Обсуждение результатов. Значительные отклонения во времени в очаге и ошибки в определении эпицентров, полученные при релокализации МЯВ по данным Байкальской региональной сети станций, могут объясняться как односторонним расположением и удаленностью сейсмических станций, так и неудовлетворительной скоростной моделью среды, выбранной для расчетов. Сопоставление реальных времен прихода сейсмических волн от МЯВ на территории Республики Саха с теоретическими показало, что для коровых продольных волн Pg наблюдается запаздывание во временах прихода, в то время как для верхнемантийных волн Pn и Sn, наоборот, наблюдаются более ранние приходы. Для волны Sg теоретические и наблюдаемые времена прихода совпадают. Это также свидетельствует о том, что реальная скоростная структура на трассе от эпицентров МЯВ до Байкальского рифта может значительно отличаться от выбранной модели. Проблема выбора модели осложняется тем, что трасса «источник – приемник» проходит через две тектонические структуры – консолидированный Сибирский кратон и Саяно-Байкальскую складчатую область, отличающуюся высокой степенью неоднородности. Возможным решением проблемы с выбором скоростной модели может быть инверсия невязок времен прихода сейсмических волн от МЯВ с использованием заверенных на местности координат и глубин взрывов по данным [8].

В целом скорости сейсмических волн в коре и верхней мантии региона, полученные в настоящей работе, достаточно хорошо согласуются с результатами исследований скоростного строения Байкальского рифта и окружающих территорий. В частности, полученные значения скоростей продольных волн в верхней мантии ($V_{Pn} = 8,25$ км/с) достаточно хорошо соответствуют значениям скоростей на границе Мохо (8 км/с), определенным по результатам сейсмического профилирования в Байкальском рифте (сверхдлинные профили «Рифт» и «Метеорит») [1]. Скорости поперечных Sn волн хорошо согласуются с результатами инверсии приемных функций: $V_s = 4,4–4,5$ км/с [6]. Пониженные значения скоростей в мантии Байкальской рифтовой системы относительно кратона отражают результаты проявления активных деформаций литосферы в зоне современной межплитной границы между Евразией и Амурской плитой.

По записям МЯВ, полученным на региональных сейсмических станциях Якутской сети (серия «Нева»), ранее в работах предшественников были определены скорости P и S волн в коре и верхней мантии Сибирского кратона: $Pn = 8,313$ км/с, $Pg = 6,158$ км/с, $Sn = 4,695$ км/с и $Sg = 3,594$ км/с [2] и $Pn = 8,27$ км/с, $Pg = 6,20$ км/с, $Sn = 4,67$ км/с и $Sg =$

3,55 км/с [4]. Видно, что значения скоростей сейсмических волн в верхней мантии, полученные в настоящей работе для тех же событий по станциям Байкальского региона, значительно ниже: на ~0,2–0,8 % для Р волн и на ~0,4–2,7 % для S волн, а в коре, напротив, выше – ~0,6–1,3 %. Такое пространственное распределение скоростей сейсмических волн хорошо согласуется с моделью SibCrust: для территории Сибирского кратона скорости Рn волн равны ~8,2 км/с, средняя кора характеризуется пониженными скоростями Р-волн (до 5,2 км/с), в кристаллическом коровом фундаменте $V_{Pg} = 6,6$ км/с; для Саяно-Байкальской складчатой области отмечается понижение сейсмических скоростей в мантии до 8,1 км/с, а в коре и фундаменте, наоборот, повышение: $V_{Pg} = 5.8–6,7$ км/с [7].

Низкая скорость сейсмических волн указывает на существование региональной низкоскоростной аномалии под корой. Ранее существование аномально низкой скорости сейсмических волн под границей Мохо было установлено по данным ГСЗ [5]. Также слой с высоким затуханием сейсмических волн под корой северо-восточного фланга Байкальского рифта наблюдается согласно результатам расчетов сейсмической добротности [9]. Существование такого слоя может быть связано с возможным частичным плавлением материала под корой северо-восточного фланга БРС [10].

Заключение. В результате обработки аналоговых сейсмограмм МЯВ, зарегистрированных Байкальской сетью сейсмических станций на расстояниях от 249 до 1407 км, получены данные о временах прихода сейсмических волн Рn, Рg, Sn and Sg. Выполнена релокализация эпицентров ядерных взрывов с использованием региональных скоростных моделей. Построены региональные годографы прямых и отраженных от границы Мохо продольных и поперечных волн, которые могут быть использованы в дальнейшем для локализации региональных землетрясений и промышленных взрывов на севере региона. Определены скорости сейсмических волн в коре и мантии. По полученным данным хорошо фиксируются пониженные скорости в верхней мантии и высокие – в коре.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 17-45-388049.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pavlenkova, G. A., Pavlenkova, N. I. Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // *Tectonophysics*. – 2006. – № 416. – P. 33–52.
2. Mackey K. G., Fujita K., Hartse H. E., Steck L. K., Stead R. J. Seismic characterization of Northeast Asia and analysis of the Neva peaceful nuclear explosions // *The 27th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. – 2005. – P. 61–70.
3. Sultanov D. D., Murphy J. R., Rubinstein Kh. D. A seismic source summary for Soviet peaceful nuclear explosions // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1999. – V. 89 (3). – P. 640–647.
4. Burkhard K. M., Eriksen Z. T., Mackey K. G. Peaceful Nuclear Explosion Seismogram Analysis: Constraining the Velocity Structure of Eastern Siberia // *AGU Fall Meeting*. – 2016. – T43B-3047. (<http://abstractsearch.agu.org/meetings/2016/FM/T43B-3047>).
5. Крылов С. В., Мандельбаум М. М., Мишенькин Б. П., Мишенькина З. Р., Петрик Г. В., Селезнев В. С. Недр Байкала (по сейсмическим данным). – М.: Наука, 1981. – 105 с.
6. Мордвинова В. В. Строение земной коры и верхней мантии Центральной Азии на основе телесейсмических объемных волн. Автореф. ... д-ра геол.-мин. наук / Ин-т земной коры СО РАН. – Иркутск, 2009. – 50 с.
7. Cherepanova Y., Artemieva I. M., Thybo H., Chermia Z. Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // *Tectonophysics*. – 2013. – № 609. – P. 154–183.
8. Mackey K. G., Fujita K., Abishev A., Bergman E. Improvement of GT classification of Soviet PNEs // *NNC RK Bulletin*. – 2016. – № 2(66). – P. 123–127.
9. Добрынина А. А., Саньков В. А., Чечельницкий В. В. Новые данные о затухании сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы // *Доклады академии наук*. – 2016. – Т. 468, № 1. – С. 88–92.
10. Pospeev A. V. The velocity structure of the upper mantle and regional deep thermodynamics of the Baikal rift zone // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2012. – № 3 (4). – P. 377–383.

Статья принята в редакцию 25.12.2017 г.

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Выпуск 2. 2017 г.

Литературные редакторы *И. Б. Бражникова, Г. П. Созонтова*
Технический редактор *А. И. Шеховцов*
Дизайнер *И. М. Батова*

Подписано в печать 29.12.2017 г.
Формат 60×90/8. Гарнитура Times New Roman. Бумага Ballet.
Уч.-изд. л. 25,7. Усл. печ. л. 27,3. Тираж 125 экз. Заказ № 800.

Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1