

УДК 550.34.097

## ОЦИФРОВКА И АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКИХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Добрынина А.А.<sup>1,2</sup>, Саньков В.А.<sup>1,3</sup>, Чечельницкий В.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, dobrynina@crust.irk.ru

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

<sup>3</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, sankov@crust.irk.ru

<sup>4</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, chechel@crust.irk.ru

### Введение

В течение 1976 – 1987 гг. в бывшем Советском Союзе на территории Иркутской области и Забайкальского края (Восточная Сибирь), а также республики Саха было произведено 10 подземных ядерных взрывов (ПЯВ) (рис. 1). На территории Иркутской области и Забайкальского края взрывы были произведены с научной целью и вошли в состав сверхдлинных профилей глубинного сейсмического зондирования «Рифт» и «Метеорит» (3 взрыва) [12]. Остальные 7 взрывов, локализованные на юго-западе республики Саха, имели коммерческое применение (увеличение добычи нефти, строительство нефтехранилища и пр.) [11]. Мощность взрывов варьировала от 3.2 до 15.0 кт (1 килотонна в тротиловом эквиваленте =  $4.184 \cdot 10^{12}$  Дж) [14].

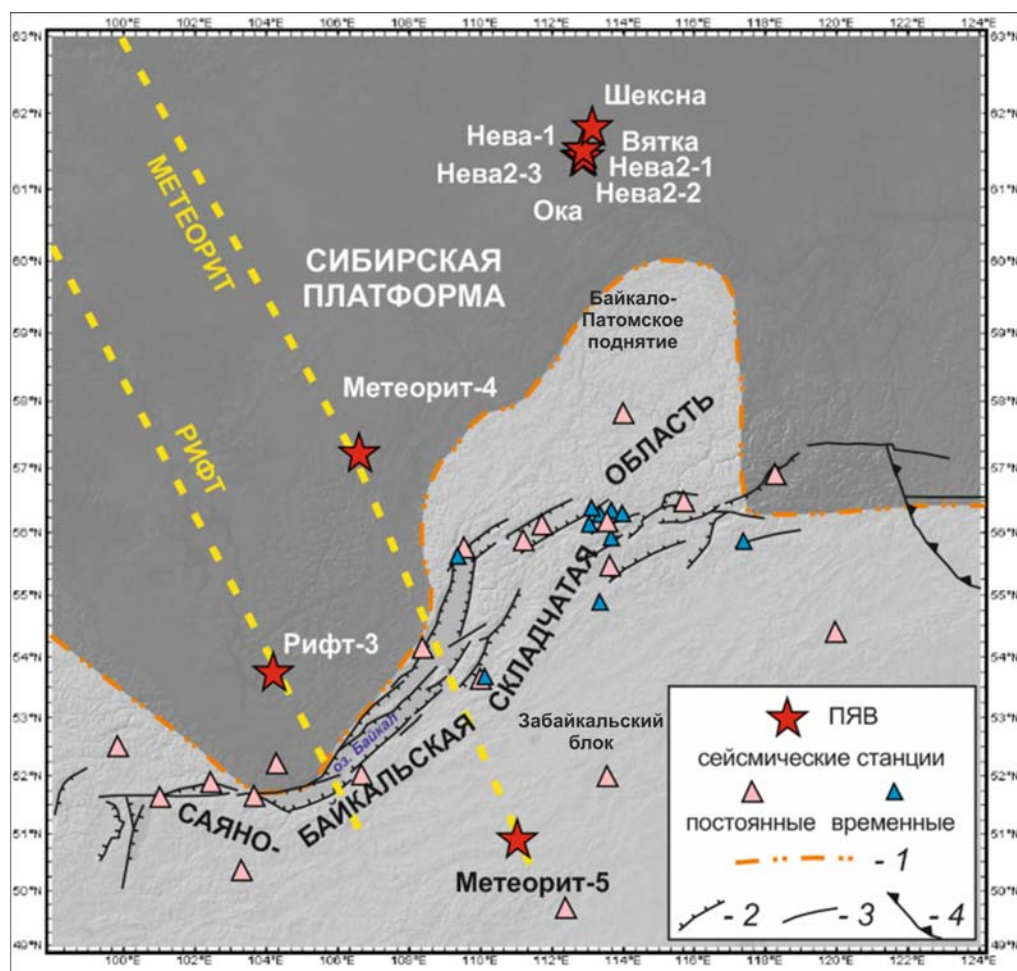


Рис. 1. Положение эпицентров подземных ядерных взрывов и сейсмических станций Байкальской сети. Темный цвет - Сибирская платформа; желтые линии - сверхдлинные сейсмические профили «Рифт» и «Метеорит»; 1 – граница между Сибирской платформой и Саяно-Байкальской складчатой областью; (2 – 4) – разломы: 2 – сбросы, 3 – сдвиги, 4 – взбросы и надвиги; звездочка – ПЯВ; треугольник – сейсмическая станция.

Взрывы были зарегистрированы региональной сетью сейсмических станций, действовавшей на территории Байкальской рифтовой системы (БРС) и прилегающих областей (современный международный код BAGSR). Известен ряд работ, посвященных исследованию взрывов в республике Саха («Шексна», «Ока», «Вятка», серия взрывов «Нева») по данным Якутской региональной сети сейсмических станций [6, 11]. Однако до настоящего времени данные Байкальской сети для обработки ПЯВ не привлекались. В статье представлены первые предварительные результаты анализа сейсмограмм ПЯВ, полученных региональной Байкальской сетью сейсмических станций.

### **Исследуемый регион**

На территории исследуемого региона структурами первого порядка являются архейско-протерозойская Сибирская платформа и Саяно-Байкальская складчатая область. Кайнозойская Байкальская рифтовая система (БРС) наложена на обе эти древние структуры (рис. 1). Вместе со Алдано-Становой подвижной областью БРС представляет активную внуконтинентальную 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 [3]. Согласно данным ГСЗ [3] область с аномально низкой скоростью на поверхности мантии ( $V_p = 7.6 - 7.8$  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  $V_p = 8.0 - 8.1$  км/с,  $V_s = 4.55$  км/с. По результатам инверсии невязок времен пробега Р-волн на станциях региональной сети под северо-восточным флангом Байкальской рифтовой системы также наблюдается понижение значений скоростей сейсмических волн в областях возможного частичного плавления мантии, обусловленного тепломассопереносом из-под Сибирского кратона [4]. Согласно ГСЗ [3] 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 период 1976 – 1987 гг. сеть состояла из 20 постоянных и 12 временных аналоговых сейсмических станций (рис. 1). Станции сети были оснащены короткопериодной (сейсмометры 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 (рис. 1).

Расстояния от эпицентров ПЯВ до сейсмических станций варьируются в пределах 173 – 1407 км. На сейсмограммах хорошо выделяются продольные прямая и отраженная от границы Мохо Р-волны, поперечные S-волны (прямая и отраженная), также на ряде станций регистрируются цуги поверхностных волн. Всего по 10 взрывам было обработано 213 сейсмограмм и получено 582 значения времен прихода сейсмических волн: 154 –  $P_g$ , 175 –  $P_n$ , 132 –  $S_g$  и 121 –  $S_n$ . Эти данные были использованы для релокализации эпицентров взрывов, а также для оценки скоростей сейсмических волн в регионе.

### **Релокализация эпицентров взрывов**

В ряде публикаций, а также на сайте Международного сейсмологического центра приводятся координаты и глубины ПЯВ, определенные разными способами: геодезическим [3], сейсмическим ([8], а также по телесеизмическим данным сейсмологических агентств мира, International Seismological Center, <http://www.isc.ac.uk/>), поиска мест взрывов (шахт) на местности [10], а для взрывов, входящих в состав сверхдлинных профилей «Рифт» и «Метеорит», – также по архивным данным [12]. Для каждого взрыва имеется от 6 до 9 различных определений параметров очага. Координаты эпицентра и глубины, время в очаге, а также магнитуда событий могут очень сильно различаться (различия в координатах составляют несколько градусов, а глубины варьируются от 0 до 38.3 км).

Проблема выбора скоростной модели среды осложняется тем, что трасса «источник – приемник» проходит через две тектонические структуры – древнюю Сибирскую платформу 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 ПЯВ с использованием заверенных на местности координат и глубин взрывов по данным [10].

Для построения регионального годографа и определения скоростей сейсмических волн в коре и верхней мантии региона использовались определенные по аналоговым сейсмограммам времена вступлений основных сейсмических фаз – Pg, Pn, Sg и Sn. Построение годографов и оценка скоростей сейсмических волн выполнены как для всего региона по всем станциям и взрывам, так и отдельно для трех крупных тектонических структур, входящих в его состав – Сибирской платформы, Байкало-Патомского нагорья и Забайкальского блока Амурской литосферной плиты (рис. 1). Для расчета значений скоростей в литосфере Сибирской платформы использованы данные взрывов «Рифт-3» и «Метеорит-4», полученные на станциях, локализованных на западном побережье оз. Байкал и в пределах юго-западного фланга рифтовой системы; в Забайкальском блоке использованы данные взрыва «Метеорит-5», полученные на станциях, расположенных в пределах самого блока и близ восточного побережья оз. Байкал. Для Байкало-Патомского нагорья рассматривались взрывы на территории Якутии, зарегистрированные сейсмическими станциями северо-восточного фланга БРС. Годограф для всей территории построен для расстояний от 173 до 1407 км (рис. 2), полученные скорости сейсмических волн для каждой структуры приведены в таблице.

[illegible]

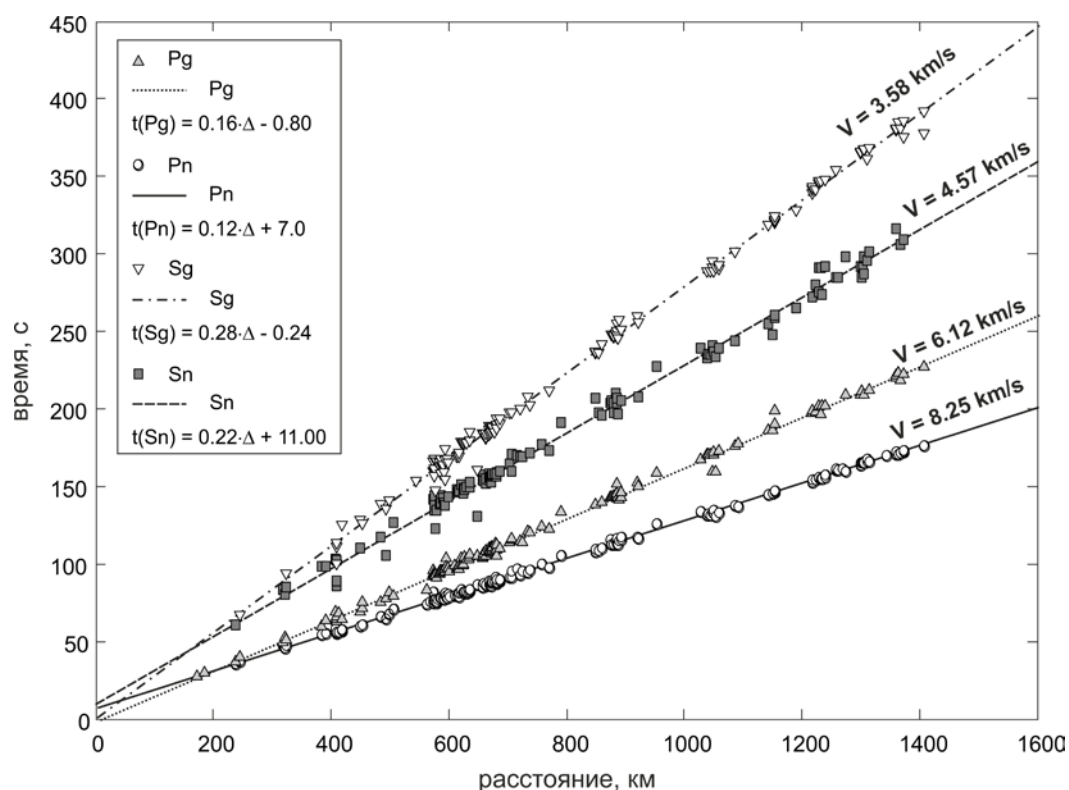


Рис. 2. Годограф региональных фаз сейсмических волн для БРС на основе данных ПЯВ.

### Обсуждение результатов

В целом скорости сейсмических волн в коре и верхней мантии региона, полученные в настоящей работе, достаточно хорошо согласуются с результатами предшествующих 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 (8.0 км/с), определенным по результатам сейсмического профилирования в Байкальском рифте (сверхдлинные профили «Рифт» и «Метеорит») [12]. Скорости поперечных  $S_n$  волн хорошо согласуются с результатами инверсии приемных функций –  $V_s = 4.4 - 4.5$  км/с [4].

По записям ПЯВ, полученным на региональных сейсмических станциях Якутской сети (серия «Нева»), в предшествующих работах были определены следующие значения скоростей  $P$  и  $S$  волн в коре и верхней мантии Сибирского кратона:  $V_{Pn} = 8.313$  км/с,  $V_{Pg} = 6.158$  км/с,  $V_{Sn} = 4.695$  км/с и  $V_{Sg} = 3.594$  км/с [11] и  $V_{Pn} = 8.27$  км/с,  $V_{Pg} = 6.20$  км/с,  $V_{Sn} = 4.67$  км/с и  $V_{Sg} = 3.55$  км/с [6]. Значения скоростей сейсмических волн в верхней мантии, полученные в настоящей работе для тех же событий по станциям Байкальского региона, значительно ниже: на  $\sim 0.2-0.8$  % для  $P$  волн и на  $\sim 0.4-2.7$  % для  $S$  волн, а в коре, напротив, выше  $\sim 0.6-1.3$  %. Такое пространственное распределение скоростей сейсмических волн хорошо согласуется с моделью SibCrust: для территории Сибирского кратона скорости  $P_n$  волн равны  $\sim 8.2$  км/с, средняя кора характеризуется пониженными скоростями  $P$ -волн (до 5.2 км/с), в кристаллическом 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].

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. 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 [3]. Позднее это было подтверждено данными исследований на двух субмеридиональных опорных профилях ГСЗ: 1-СБ и 3-ДВ, - на территории Восточного Забайкалья [2]. Согласно результатам сейсмотомографии по временам пробега от региональных землетрясений [5], область пониженных скоростей сейсмических  $P$ -волн приурочена к северо-восточному флангу

БРС, скорости увеличиваются на юго-восток (Забайкальский блок) и северо-запад (Байкало-Патомское поднятие).

Слой с высоким затуханием сейсмических волн под корой северо-восточного фланга Байкальского рифта наблюдается также согласно результатам расчетов сейсмической добротности [1]. Существование такого слоя может быть связано либо с возможным внедрением силла базальтов, выплавившихся в мантии северо-восточного фланга БРС [11], либо с наличием высокотемпературной шпинель-пироксеновой фации мантии [13].

### Заключение

В результате обработки аналоговых сейсмограмм ПЯВ, зарегистрированных Байкальской сетью сейсмических станций на расстояниях от 173 до 1407 км, получены данные о временах прихода сейсмических волн Pn, Pg, 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. Определены скорости сейсмических волн в коре и мантии. По полученным данным хорошо фиксируются пониженные скорости в верхней мантии и высокие – в коре.

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

Работа Добрыниной А.А. выполнена в рамках темы НИР ПФНИ ГАН IX.136.1.2. Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья (Гос номер АААА-А16-116121550016-3).

### Список литературы

1. 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.
2. Канарейкин Б.А., Сальников А.С., Кравченко Е.А., Титаренко В.В. Строение переходной зоны кора – мантия Байкальской рифтовой зоны по опорным и региональным сейсмическим профилям ГСЗ // Материалы совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». Вып. 15. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 114–116.
3. Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С. Недра Байкала (по сейсмическим данным). М.: Наука, 1981. 105 с.
4. Мордвинова В.В. Строение земной коры и верхней мантии Центральной Азии на основе телесеизмических объемных волн: автореф. докт. дис. Иркутск, 2009. 50 с.
5. Соловьев В.М., Чечельницкий В.В., Сальников А.С., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Галёва Н.А. Особенности скоростного строения верхней мантии Забайкалья на участке Монголо-Охотского орогенного пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 1065–1082. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0333.
6. Burkhard K.M., Eriksen Z.T., Mackey K.G. Peaceful Nuclear Explosion Seismogram Analysis: Constraining the Velocity Structure of Eastern Siberia // 2016 AGU Fall Meeting. 2016. T43B-3047. (<http://abstractsearch.agu.org/meetings/2016/FM/T43B-3047>).
7. Cherepanova Y., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia 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. Engdahl E.R., van der Hilst R.D., Buland R. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures // Bull. Seis. Soc. Amer. 1998. V. 88. P. 722–743.
9. Lienert B., Bery E., Frazer L.N. HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares // Bull. Seismol. Soc. Am. 1986. V. 76. P. 771–783.
10. Mackey K.G., Fujita K., Abishev A., Bergman E. Improvement of GT classification of Soviet PNEs // NNC RK Bulletin. 2016. V. 66. No 2. P. 123–127.
11. 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.
12. Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I. Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // Tectonophysics. 2006. № 416. P. 33–52.
13. Pospeev A.V. The velocity structure of the upper mantle and regional deep thermodynamics of the Baikal rift zone // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. V. 4. № 3. P. 377–383.
14. 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. P. 640–647.