

УДК 550.834.42+550.34

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПРОФИЛЬНЫХ И ПЛОЩАДНЫХ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИБИРИ

В.М. Соловьев¹, В.С. Селезнев², А.Ф. Еманов¹, А.В. Лисейкин²,
С.В. Шибаев³, В.В. Чечельницкий⁴, Н.А. Галёва¹

¹АСФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³ЯФ ФИЦ ЕГС РАН, 677007, Якутск, ул. Ленина, 39, Россия

⁴БФ ФИЦ ЕГС РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Для ряда сейсмоактивных зон Сибири в настоящее время еще отсутствуют детальные сведения о распределении гипоцентров землетрясений, что связано с редкими сетями сейсмологических наблюдений. В работе представлены результаты определения глубин землетрясений на нескольких сейсмогенных участках в Алтае-Саянском регионе, Прибайкалье, Забайкалье и Якутии с использованием времени пробега продольных преломленных волн от границы Мохоровичича (P_n -волны) от землетрясений и сведений о глубинном строении этих регионов, полученных в последние годы. Тестирование алгоритма определения глубин осуществлялось на данных от aftershocks крупных тувинских землетрясений 2011—2012 гг. ($M_L = 6.7$ и 6.8), зарегистрированных как региональной сейсмологической сетью, так и локальной группой сейсмостанций. Получено близкое совпадение глубин aftershocks при разных способах определений, в том числе и для главных толчков — землетрясениям Тувинское-1 и Тувинское-2. Хорошее совпадение глубин землетрясений при определении по P_n -волнам получено также в материалах региональных и детальных исследований Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН на участке Муйканской активизации в Байкальской рифтовой зоне. Полученные данные дополняют сведения по гипоцентрии главного толчка и подтверждают смену кластера Муйканской активизации с больших глубин на малые с начала активизации в 2014 г. Новые сведения по глубинам землетрясений с использованием P_n -волн получены в Якутии по границе крупнейших Евразийской и Охотоморской тектонических плит. Установлено их понижение до 6—12 км по сравнению с повышенными глубинами в 20—30 км на сопредельных участках. Полученный ряд новых сведений о распределении гипоцентров землетрясений с использованием P_n -волн чрезвычайно важен, прежде всего, как указывающий на возможность выявления и переопределения гипоцентров землетрясений по материалам сейсмологических наблюдений прошлых лет в сейсмоактивных зонах Сибири.

Гипоцентры землетрясений, граница Мохоровичича, сейсмологические данные, граничная скорость P_n -волн, региональная сеть сейсмостанций

DETERMINATION OF EARTHQUAKE DEPTHS USING DATA OF CROSS-SECTIONAL AND AREAL DEEP SEISMIC STUDIES IN SIBERIA

В.М. Соловьев, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, А.В. Лисейкин, С.В. Шибаев,
В.В. Чечельницкий, Н.А. Галёва

Information on the distribution of earthquake hypocenters for many seismically active zones of Siberia remains insufficient, which is associated with sparse networks of seismological observations. The paper presents the results of determining the earthquake depths in several seismogenic areas in the Altai-Sayan region, Cisbaikalia, Transbaikalia, and Yakutia using the travel time of longitudinal refracted waves from the Mohorovičić discontinuity (P_n waves) from earthquakes and the recently obtained information about the deep structure of these regions. The depth determination algorithm is tested using data from aftershocks of large earthquakes occurring in Tuva in 2011 and 2012 ($M_L = 6.7$ and 6.8), recorded both by the regional seismological network and by a local group of seismic stations. Different methods are applied to reveal that some aftershock depths have a close match, including those for the main shocks – the Tuva-1 and Tuva-2 earthquakes. Another good match of earthquake depths is obtained using P_n waves with materials from regional and detailed studies of the Baikal branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences in the Muyakan activation site in the Baikal rift zone. The resulting data complement the information on the hypocenter of the main shock and confirm the change of the Muyakan activation cluster from large depths to shallow ones since the onset of activation in 2014. New information on the earthquake depths using P_n waves is obtained in Yakutia along the border of the largest Eurasian and Okhotsk tectonic plates. It is revealed that they decrease to 6–12 km as com-

pared to higher depths of 20–30 km in adjacent areas. The resulting series of new information on the distribution of earthquake hypocenters using P_n waves is extremely important mostly because it indicates the possibility of identifying and redefining earthquake hypocenters using previous seismological observations in seismically active zones of Siberia.

Earthquake hypocenters, Mohorovičić discontinuity, seismological data, P_n wave boundary velocity, regional network of seismic stations

ВВЕДЕНИЕ

Сведения о распределении гипоцентров землетрясений в сейсмоактивных зонах несут очень ценную информацию, необходимую при изучении физических процессов в очагах землетрясений, исследовании сейсмического режима региона, оценке сейсмической опасности и изучении его глубинного строения [Гайский, Жалковский, 1972; Шемякин, Щеглов, 1974; Сейсмическая томография..., 1990; Мордвинова и др., 2003; Селезнев и др., 2004]. Для сейсмоактивной зоны Сибири (Алтай, Байкальская рифтовая зона, Арктико-Азиатский и Байкало-Становой сейсмические пояса) фактически до 2000 г. были получены лишь общие оценки средних глубин гипоцентров, составляющие для большей части территории 10–20 км [Цибульчик, 1966; Гайский, Жалковский, 1972; Голенецкий, 1977; Крылов, 1980], что было связано главным образом со значительными расстояниями между регистрирующими станциями и аналоговой записью сейсмограмм с невысокой точностью снятия времен вступлений. Наряду с получаемыми в настоящее время детальными данными о гипоцентрах землетрясений по ряду сейсмогенных участков территории Сибири с применением более детальной сети стационарных станций, использований групп временных станций и цифровых записей событий [Гольдин и др., 2004; Еманов, Лескова, 2005; Еманов и др., 2018], для большей части территории Сибири пока нет достаточно полных сведений по распределению гипоцентров. В то же время на территории Сибири в последние два десятилетия в рамках программ РОСНЕДРА развернуты комплексные исследования на опорных тысячекилометровых геолого-геофизических профилях (2ДВ, 2ДВ-А, 3ДВ, 1СБ, 8ДВ, 4СБ) с детальной информацией по глубинному строению земной коры и верхней мантии [Сурков и др., 2007; Селезнев и др., 2013; Кашубин и др., 2018; Соловьев и др., 2019, 2020]. Наряду с этим в ряде регионов с использованием площадных данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и сейсмологии (рис. 1) получены сведения о гипсометрическом строении поверхности Мохоровичича и распределении вдоль нее значений граничных скоростей продольных и поперечных волн [Соловьев и др., 2000, 2007, 2020]. Благодаря этой дополнительной детальной информации появляется возможность выявления и переопределения гипоцентров землетрясений по материалам сейсмологических наблюдений прошлых лет.

В работе представлено тестирование алгоритма обнаружения глубин землетрясений на основе использования времен пробега преломленных волн от границы Мохоровичича (P_n) от афтершоков крупных тувинских землетрясений 2011–2012 гг. ($M_L = 6.7$ и 6.8), зарегистрированных как региональной сейсмологической сетьью, так и локальной временной группой станций вблизи зоны активизаций. Приведены примеры определения глубин гипоцентров в Якутии в области сочленения Евразийской литосферной плиты с Северо-Американской и Охотоморской плитами и на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) на участке крупной Муйканской сейсмической активизации с 2014 г.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

По данным профильных и площадных сейсмологических исследований в Сибири получен значительный объем сведений о глубинном строении земной коры и верхней мантии и особенно о гипсометрическом строении поверхности Мохоровичича и распределении вдоль нее значений граничных скоростей продольных и поперечных волн [Крылов и др., 1981, 1990; Соловьев и др., 2007, 2016, 2020; Селезнев и др., 2013; Атлас..., 2014].

Так, в центральной части Алтас-Саянского региона установлено распределение граничных скоростей P - и S -волн по поверхности Мохоровичича на площади в 250 000 км² (см. рис. 1, а) [Соловьев и др., 2000, 2007] (рис. 2). Разработанный подход основывается на использовании относительных времен пробега волн, в которых исключаются времена в очаге и координаты гипоцентров (как правило, определяемых с большой погрешностью) [Соловьев и др., 2000]. При построении гипсометрического положения границы Мохоровичича (карты глубин) в качестве опорных были использованы данные профилей ГСЗ и геотрансектов (см. рис. 1, а) [Методика..., 1978; Соловьев и др., 2007; Алексеев и др., 2010; Атлас..., 2010].

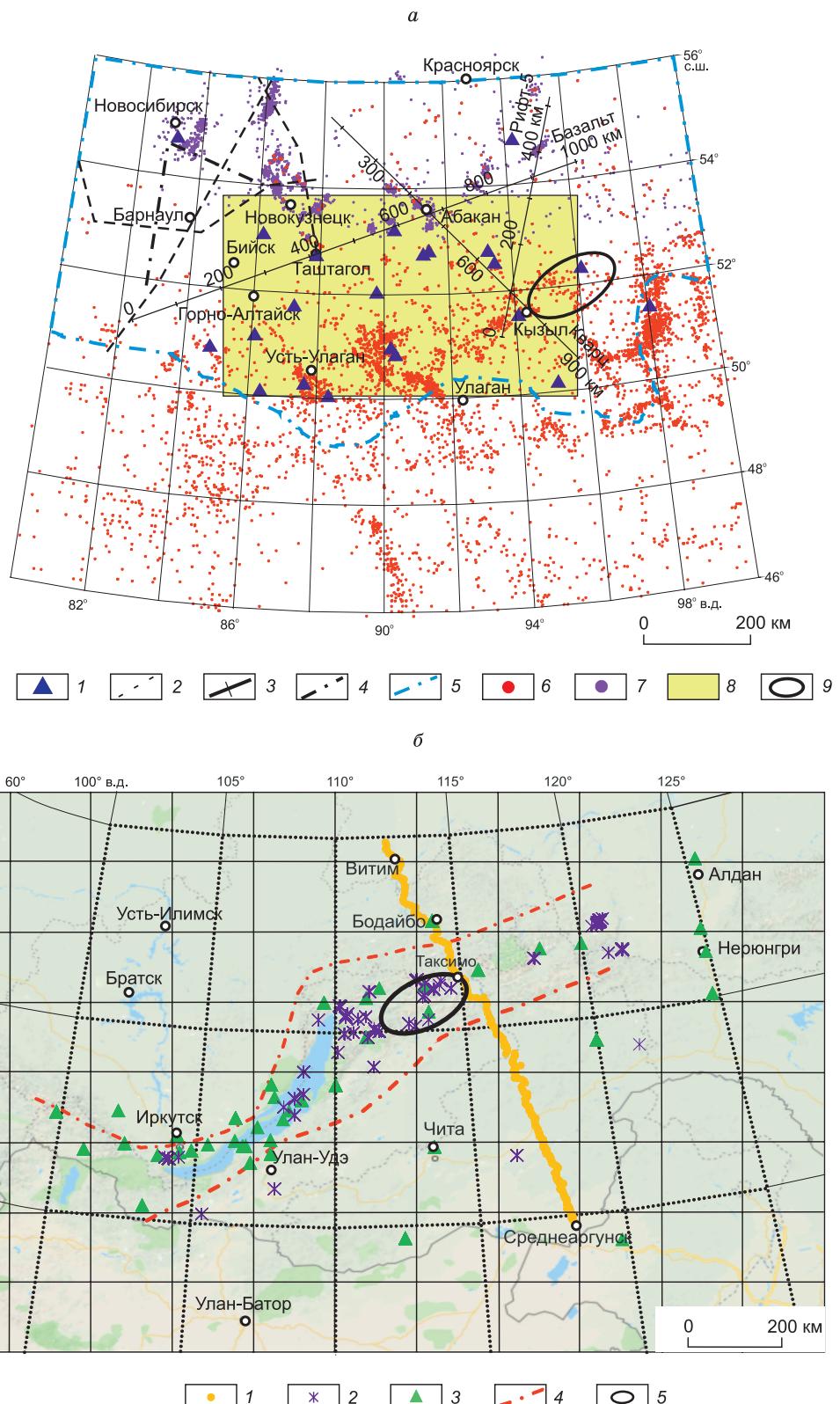


Рис. 1. Схемы профильных и площадных глубинных сейсмических исследований в Алтае-Саянской складчатой области (а) и Прибайкалье и Забайкалье (б).

а: 1 — сейсмостанции, 2 — профили ГСЗ, 3 — геотрансекты, 4 — вибросейсмические профили, 5 — граница Алтая-Саянского региона, 6 — эпицентры землетрясений ($K > 7.5$) за период 1984—2000 гг., 7 — промвзрывы, 8 — область площадных сейсмологических исследований, 9 — участок тувинских землетрясений, для которого проводились исследования; **б:** 1 — профиль 1СБ, 2 — землетрясения с $K \geq 9$, 3 — сейсмостанции, 4 — контуры Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), по [Солоненко, 1968], 5 — участок Муйканских землетрясений, для которого проводились исследования.

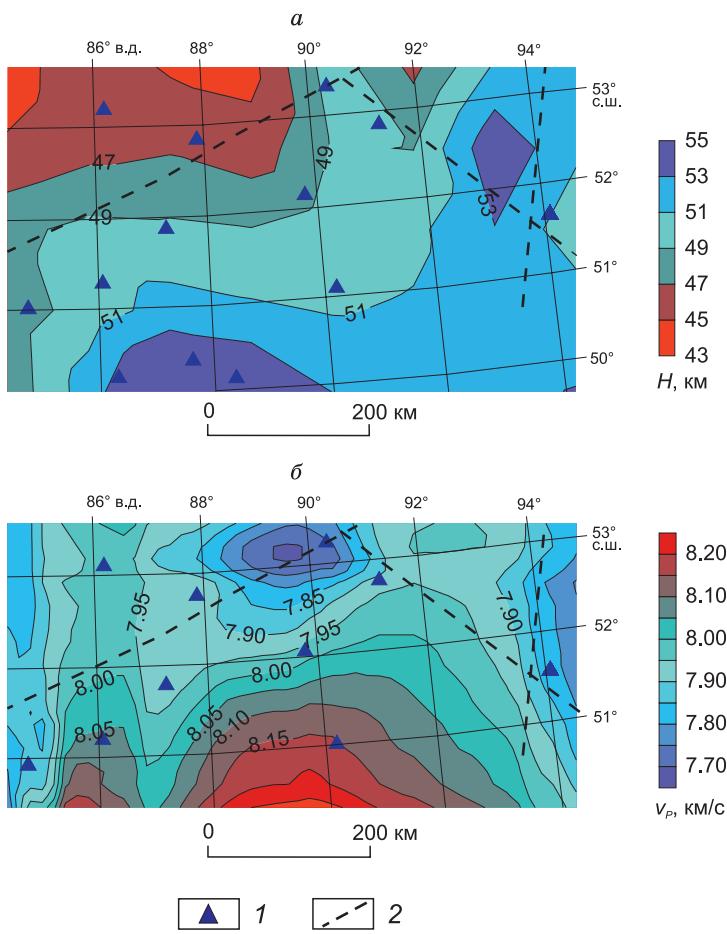


Рис. 2. Распределение глубин (а) и граничной скорости продольных волн по поверхности Мохоровичича (б) в Алтая-Саянской складчатой области.

1 — сейсмостанции, 2 — профили ГСЗ (см. рис. 1, а).

Скорость продольных волн в целом для всей площади составляет 8.0 ± 0.3 км/с (см. рис. 2, б). Выделяются области с пониженными значениями скорости от 7.7 до 7.9 км/с на западном участке исследуемой площади (в тектоническом отношении соответствующем восточному окончанию Бийско-Барнаульской впадины), северной части (соответствующей Южно-Минусинской впадине) и восточной части (район северной части Тувинской впадины и Тувинской складчатой системы) площади и области с повышенными значениями скорости от 8.15 до 8.30 км/с в южной части (район Западно-Саянской складчатой системы и юг Алтая).

Поверхность Мохоровичича расположена на больших резкоменяющихся глубинах от 45—46 км в северо-западной части площади до 53—56 км в южной и северо-восточной частях площади исследований (см. рис. 2, а).

Исследованиями на опорном геолого-геофизическом профиле 1СБ и площадными сейсмологическими исследованиями в Прибайкалье и Забайкалье (см. рис. 1, б) на значительной территории последней получено распределение граничных скоростей P -и S -волн по поверхности Мохоровичича [Соловьев и др., 2020] (рис. 3).

В северо-западной части района исследований (в пределах Байкальской рифтовой зоны) и северо-восточной части (Забайкалье) граничные скорости P -волн имеют пониженные значения — 7.80—7.95 км/с (см. рис. 3). В юго-восточной части Забайкалья в верхней мантии, по данным P -волн, выделен высокоскоростной мантийный блок с поперечными размерами около 600×600 км (см. рис. 3) [Соловьев и др., 2020]. Скорость P -волн по границе М в его пределах повышена до 8.40—8.45 км/с. В створе профиля 1СБ максимальные значения скорости продольных волн в пределах выделенного блока достигают 8.50—8.55 км/с [Соловьев и др., 2023]. Нормальные значения скорости P -волн на сопредельных участках составляют 8.1 ± 0.1 км/с (см. рис. 3).

Согласно данным опорных геофизических профилей 2ДВ и 3ДВ, получены детальные сведения о строении земной коры и мантии территории Якутии в области сочленения крупнейших литосферных плит [Селезнев и др., 2013; Соловьев и др., 2016] (рис. 4, а).

На 550-километровом фрагменте профиля 3ДВ детально отстроена граница Мохоровичича с незначительными изменениями глубин (от 38 до 44 км) и значительными изменениями граничной скорости продольных волн (от 7.75—7.80 до 8.45 ± 0.15 км/с) (см. рис. 4, б). Несущественно изменяются в створе профиля и средние (эффективные) скорости в земной коре: от 6.30 до 6.35 км/с. Область сочленения Евразийской и Охотоморской плит на сейсмическом разрезе отмечается небольшой мощностью земной коры (37—42 км), низкими значениями граничных скоростей по границе Мох от 7.85 до 8.00 км/с и пониженными значениями средних (эффективных) скоростей продольных волн в земной коре (~ 6.3 км/с).

Полученные выше сведения о глубинах залегания границы М, распределении граничной скорости на профилях и площадной сети и средней скорости в коре являются основой расчетов глубин землетрясений с использованием времен пробега P_n -волн для ряда сейсмогенных зон территории Сибири.

Методика расчетов. Схематично методику расчетов иллюстрирует представленная на рис. 5 схема. Модель среды в направлении от сейсмического события (землетрясения, промвзрыва) к каждой

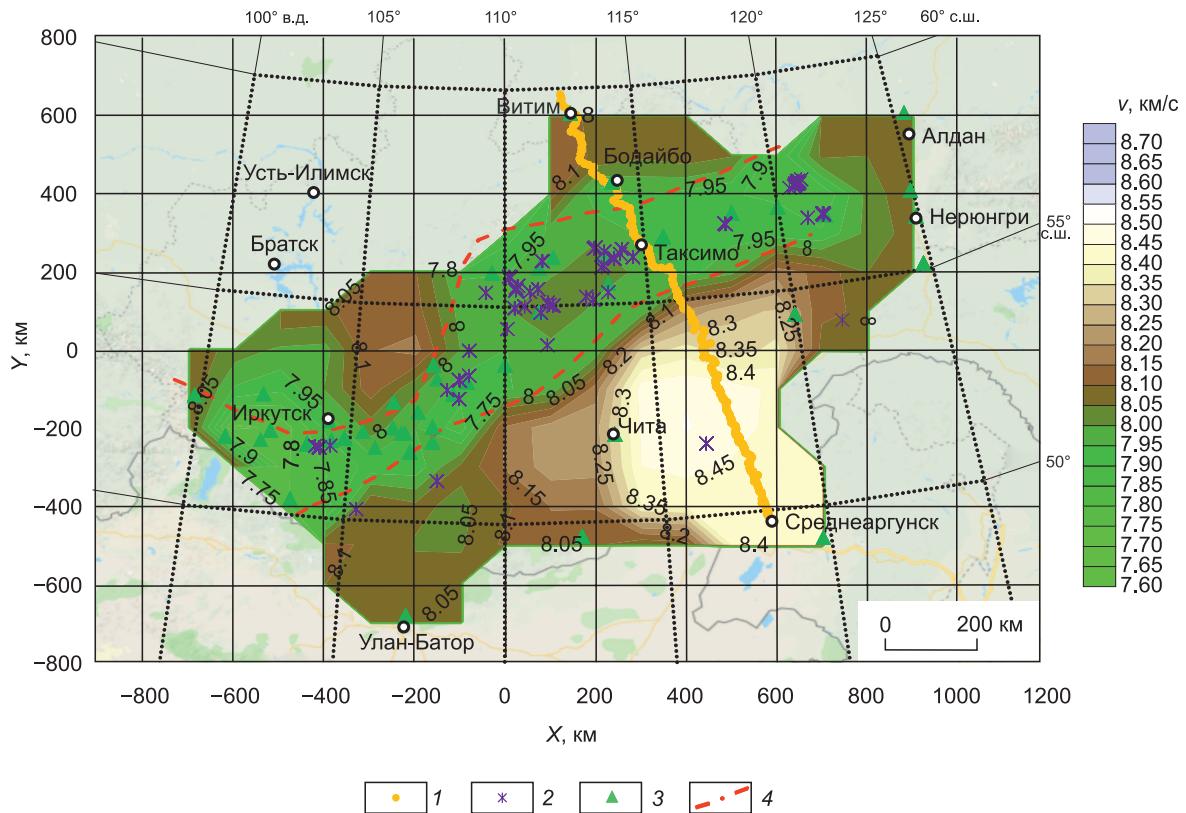


Рис 3. Распределение скорости продольных волн по границе Мохоровичича в Прибайкалье и Забайкалье.

1 — профиль 1СБ, 2 — землетрясения с $K \geq 9$, 3 — сейсмостанции, 4 — контуры Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), по [Солоненко, 1968].

приемной станции при расчетах принимается как двухслойная изотропная с криволинейной границей и переменной граничной скоростью. В районе эпицентра на участке сейсмического сноса предполагалась горизонтальная граница с постоянной граничной скоростью. Средняя скорость продольных волн во всей толще земной коры района исследований бралась по данным профилей ГСЗ и геотрансекторов. Предполагалось также, что эпицентры событий, по данным региональной сети станций, определяются достаточно точно, что подтверждается рядом теоретических расчетов [Фатеев и др., 2003].

При сделанных предположениях можно рассчитать теоретические годографы волны P_n от эпицентров событий (в предположении поверхностного размещения источника) до приемных станций. Различие теоретических и наблюденных времен волны P_n от гипоцентра k -го события до приемных j -станций определяется простым соотношением:

$$t_{kj}^0 = \frac{\cos i}{\bar{v}} h, \quad (1)$$

где $i = \arcsin \frac{\bar{v}}{v_g}$ соответственно, глубина гипоцентров определяется как

$$h = \frac{\bar{v}}{\cos i} t_{kj}^0. \quad (2)$$

Выполненные оценки показывают, что использование отсортированных сведений и статистическое осреднение по большому количеству рассчитанных данных с нескольких сейсмостанций (до 10 и более) дает точность определений глубин до первых километров.

Тестирование алгоритма. Детальное тестирование способа определения глубин землетрясений проводилось по данным от известных промвзрывов с территорий Кузбасса, Дегелена (100-тонные взры-

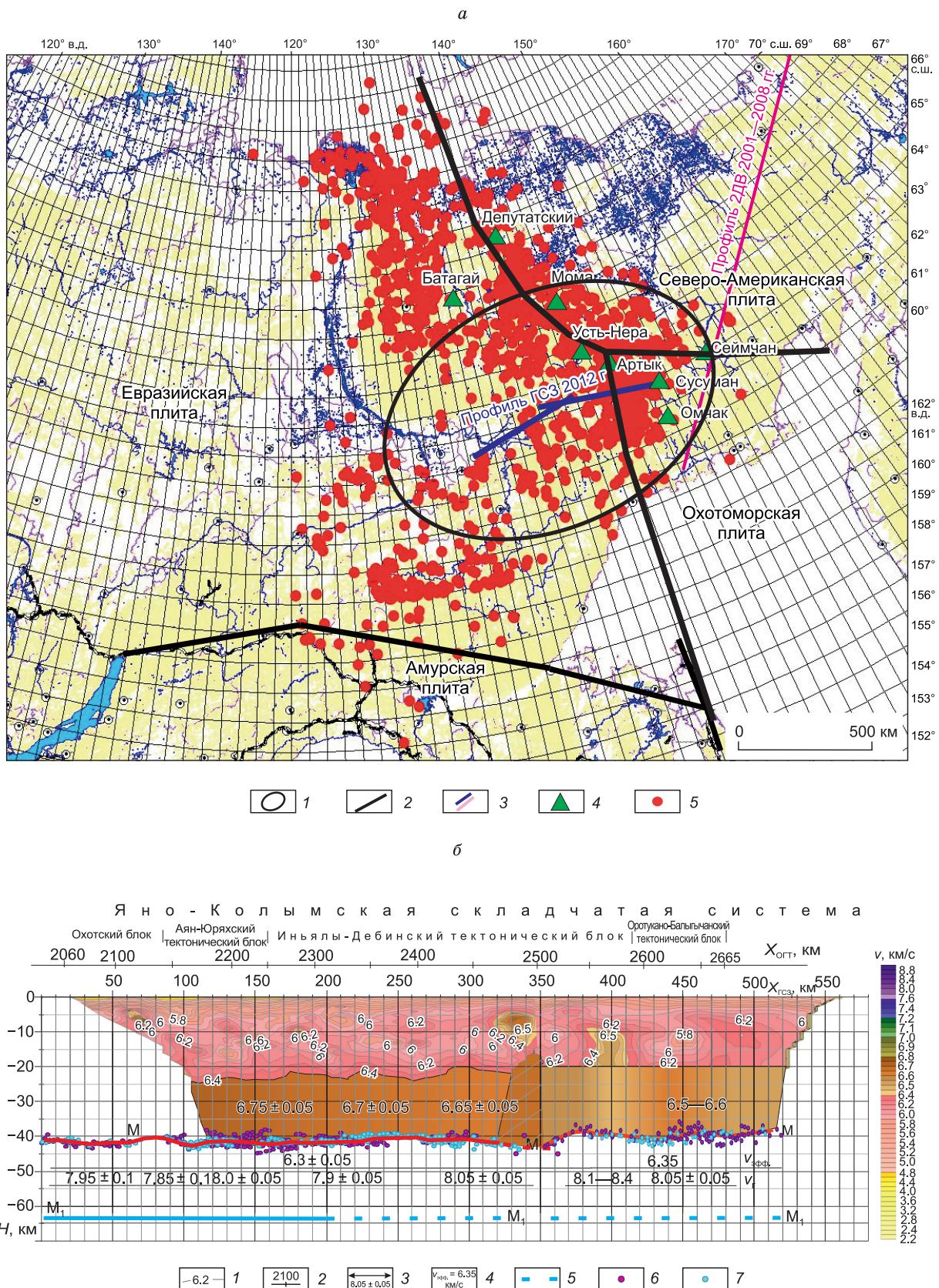
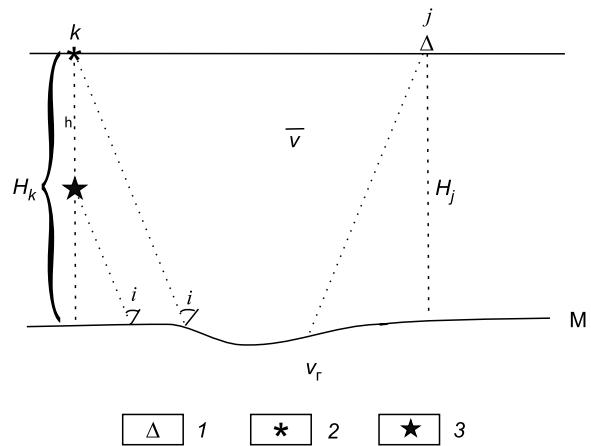


Рис. 4. Схема наблюдений (а) и глубинный сейсмический разрез на фрагменте профиля 3Д (2012—2013 гг.) (б) в области сочленения Евразийской, Охотоморской и Северо-Американской тектонических плит.

а: 1 — зона площадных сейсмологических исследований, 2 — границы плит, 3 — профили ГСЗ, 4 — сейсмостанции ЯФ ГС СО РАН, 5 — землетрясения; *б:* 1 — изолинии скорости (км/с), 2 — километраж по профилю ОГТ, 3 — граничная скорость (км/с), 4 — средняя скорость (км/с), 5 — неуверенное положение границы M_1 в верхней мантии, 6 — данные отраженных волн, 7 — данные преломленных волн.

Рис. 5. Схема расчета глубин гипоцентров сейсмических событий по данным преломленных волн от границы M .

H и h соответственно глубины до поверхности Мохоровичича и гипоцентров землетрясений; \bar{v} и v_r , соответственно средняя скорость в коре и граничная по поверхности Мохоровичича. 1 — регистрирующая станция, 2 — эпицентр событий, 3 — гипоцентр событий.



вы) и от мощного 100-тонного виброисточника, а также афтершоков крупных тувинских землетрясений 27.12.2011 ($M_L = 6.7$) и 26.02.2012 ($M_L = 6.8$), зарегистрированных региональной сетью АСФ ФИЦ ЕГС РАН (на удалениях от 200 до 800 км) [Еманов и др., 2018] (рис. 6).

Удаления сейсмостанций от тувинских землетрясений составляли от 200 до 800 км. Выполнялась сортировка и отбор данных с записями волны P_n . С этой целью с использованием площадных карт распределений глубин до границы M и граничной скорости (см. рис. 2) были рассчитаны теоретические гидографы P_n -волн со всех станций сети до эпицентров крупных тувинских землетрясений при глубинах событий от 0 до 30 км (рис. 7). Для дальнейших расчетов брались данные времен, представленные на рис. 7, попадающие в этот интервал. Как видно из рисунка, отобранные редуцированные времена P_n -волн лежат в интервале 6.6—9.6 с. Наиболее полно они представлены с удалений 310—690 км, оптимальных для прослеживания преломленной волны от поверхности Мохоровичича [Соловьев и др., 2000].

В результате такой сортировки было отобрано несколько сотен времен пробега P_n -волн от восьмидесяти землетрясений с энергетическими классами K от 8 до 16. Далее определены глубины землетрясений по отдельным станциям, по формуле (2), и осредненные значения глубин по группе станций. Анализ плотности выделенных событий показывает, что наиболее представительные данные получены для юго-западного и северо-западного участков афтершокового процесса землетрясения Тувинское-1 и северо-восточного участка афтершокового процесса землетрясения Тувинское-2.

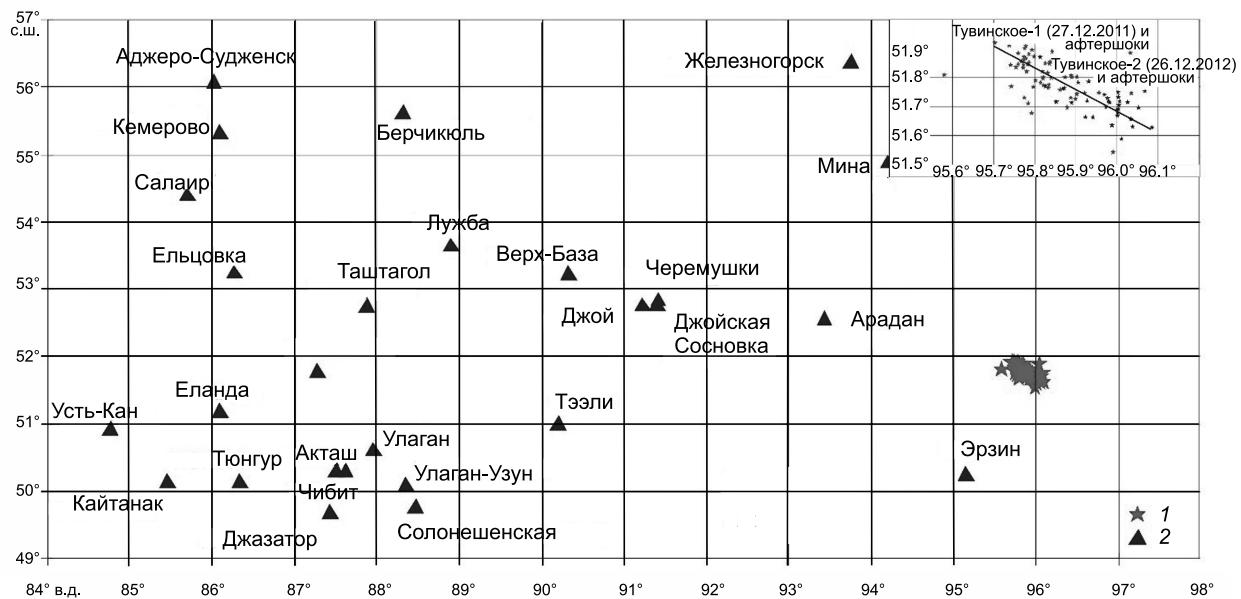


Рис. 6. Сеть сейсмостанций Алтай-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН, используемых при определении глубин афтершоков тувинских землетрясений в 2011 и 2012 гг.

На врезке дана карта эпицентров афтершоков землетрясений Тувинское-1 и Тувинское-2 и осредняющая их линия. 1 — события, 2 — станции.

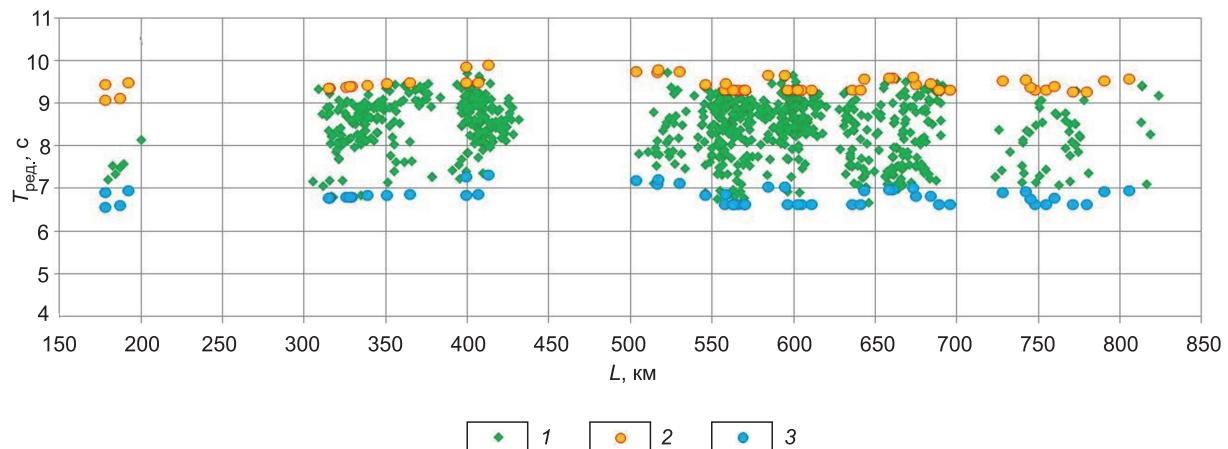


Рис. 7. Редуцированные годографы с отобранными данными P_n -волн от афтершоков тувинских землетрясений для определения их глубин.

1 — реальные $T_{\text{ред.}}$, по которым вычислены глубины; 2 — $T_{\text{ред.}}$ при $H_{\text{земл.}} = 0$ км; 3 — $T_{\text{ред.}}$ при $H_{\text{земл.}} = 30$ км. $T_{\text{ред.}} = T - L/8$ — редуцированное время (с), L — расстояние (км).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИН ГИПОЦЕНТРОВ РЯДА СЕЙСМОГЕННЫХ ЗОН ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ

Тувинские землетрясения. Распределение осредненных значений глубин тувинских землетрясений, снесенные на осредняющую линию эпицентров афтершоков в период с 27.12.2011 по 27.03.2012 г., представлено на рис. 8.

В целом гипоцентры землетрясений равномерно распределены вдоль профиля и лежат в диапазоне 2—25 км с максимумом в интервале 7—15 км. Средние значения глубин двух главных толчков — землетрясений Тувинское-1 и Тувинское-2, определенные с использованием волн P_n , составили 17 и 13 км соответственно. Они практически совпадают с обнаруженными ранее глубинами по данным обработки с участием региональных и временных детальных станций (17 км для землетрясения 27.12.2011 и 14 км для землетрясения 26.02.2012). Представленные на рис. 8 глубины афтершоков землетрясения Тувинское-1, выявленные по P_n -волнам, относятся к периоду с 27.12.2011 по 09.02.2012 г., когда отсутствовала

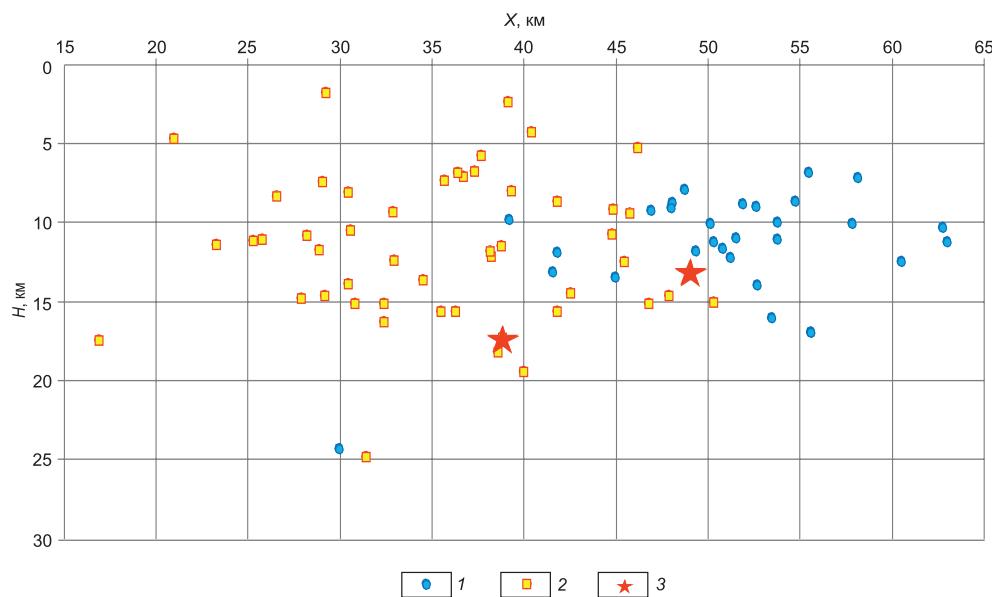


Рис. 8. Глубины афтершоков тувинских землетрясений 2011 и 2012 гг., определенные с использованием данных P_n -волн (снесенные по линии вдоль активизации на врезке рис. 6).

1 — землетрясение Тувинское-1 и его афтершоки, 2 — землетрясение Тувинское-2 и его афтершоки, 3 — главные точки.

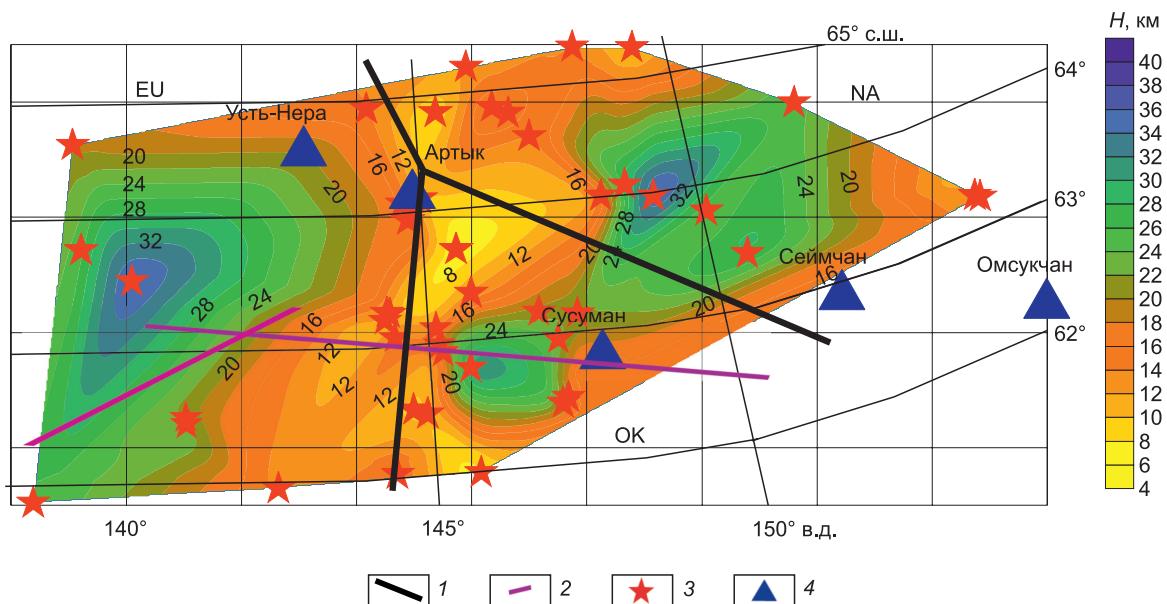


Рис. 9. Глубины землетрясений в области сочленения Евразийской (ЕУ), Северо-Американской (НА) и Охотоморской (ОК) тектонических плит на востоке России, определенные с использованием данных P_n -волн.

1 — границы тектонических плит, 2 — фрагменты профиля ЗДВ, 3 — эпицентры землетрясений, 4 — сейсмостанции.

локальная детальная сеть сейсмостанций, выставленная после землетрясения 27.12.2011. Эти данные не противоречат полученным позднее с временной локальной сетью детальным сведениям о развитии афтершокового процесса в зоне тувинских землетрясений и дополняют их [Еманов и др., 2018].

Область сочленения тектонических плит на востоке России. В качестве исходных сведений при определении глубин землетрясений в области сочленения тектонических плит на востоке России (рис. 9) использовались времена пробега преломленных волн (P_n) от поверхности Мохоровичча от землетрясений, зарегистрированные сетью сейсмологических станций Якутии и Магаданской области на исследуемой площади. Использовались уверенные данные 9—13-го энергетического класса за период 1995—2010 гг. с пятью сейсмологическими станциями, наиболее близко расположенных к линии профиля ЗДВ (сейсмостанции Омсукчан, Сеймчан, Сусуман, Артык, Усть-Нера на рис. 4, а), общим количеством около 50 записей.

Анализ пространственного распределения глубин гипоцентров на исследуемой площади показывает на определенную корреляцию с границей сочленения плит. По границе Евразийской плиты с Северо-Американской и Охотоморской отмечаются пониженные глубины гипоцентров в 6—12 км, в то время как сопредельным участкам соответствуют повышенные глубины гипоцентров землетрясений до 20—30 км.

Прибайкалье и Забайкалье. Тестирование алгоритма определения глубин гипоцентров с использованием времен P_n -волн проводилось на одном из сейсмоактивных участков Байкальской рифтовой зоны в створе опорного профиля 1СБ. Было взято более 500 времен пробега от двух десятков землетрясений 12-го энергетического класса и выше участка Муйканских землетрясений 2014 г. [Гилёва и др., 2020] (рис. 10).

Выбор такого участка связан с несколькими причинами. Во-первых, в этом районе с 2014 г. идет активный сейсмический процесс с множеством афтершоков, причем крупных [Мельникова и др., 2019; Гилёва и др., 2020], а ранее, более 100 лет назад (в 1917 г.), практически в этой зоне произошло крупное Северобайкальское землетрясение с $M = 6.6$ (56.0° с.ш., 113.8° в.д.) [Новый каталог..., 1977; Соловьев, 1985]. Кроме того, по данным многоволновых детальных глубинных сейсмических исследований, на опорном геолого-геофизическом профиле 1СБ в земной коре этой зоны выявлены значительные сейсмические неоднородности с контрастом сейсмических аномалий более сильным, чем на участке Муйского землетрясения 1957 г. с $M = 7.6$ [Соловьев и др., 2023], что может свидетельствовать о повышенном здесь напряженном состоянии и может привести к крупнейшему землетрясению.

Поэтому любые данные о параметрах сейсмического процесса, в том числе и точное распределение глубин гипоцентров землетрясений в этой напряженной зоне, являются чрезвычайно информативными и важными сейсмологам и геофизикам в решении задач прогноза сейсмической опасности.

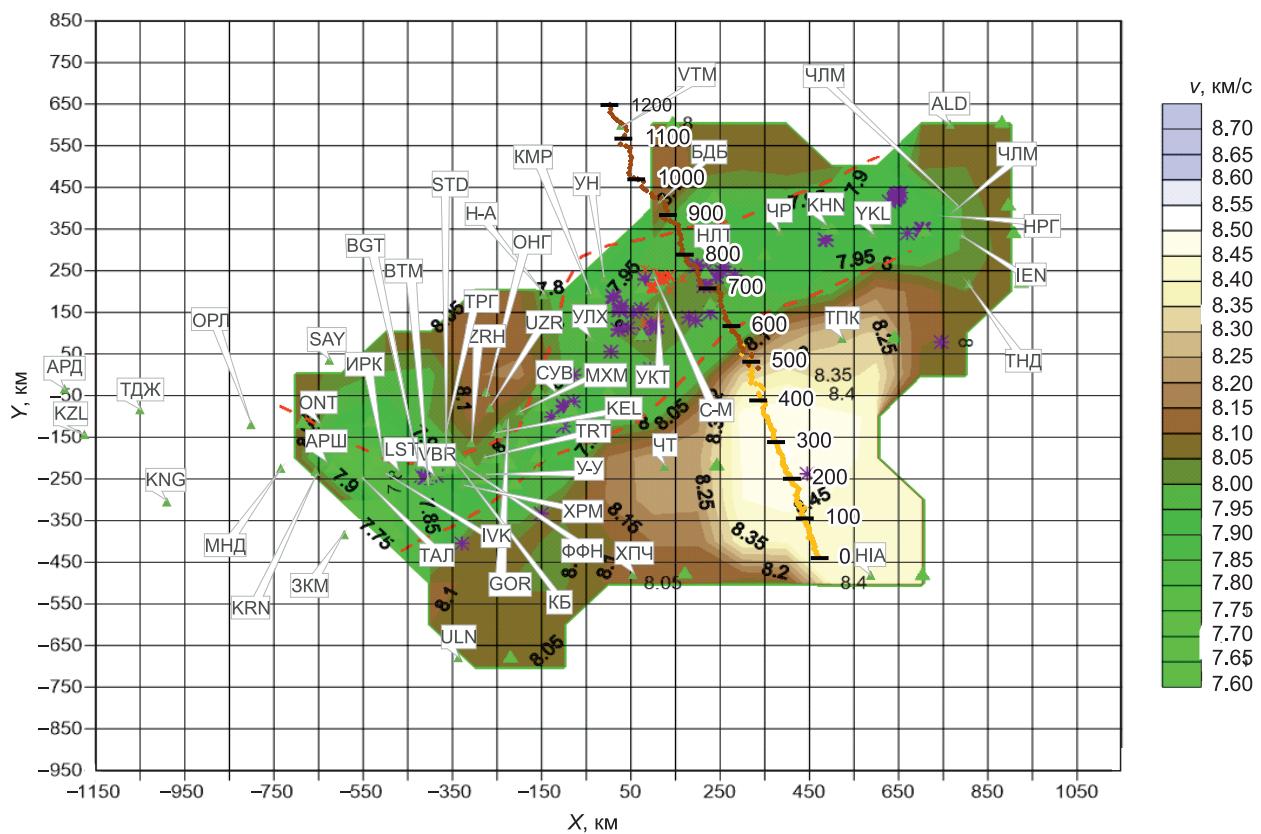


Рис. 10. Распределение граничной скорости P -волн по границе Мохоровичча в Прибайкалье и Забайкалье.

Усл. обозн. см. на рис. 1, б; красными крестиками выделены отдельные землетрясения с $K \geq 12$ в Муяканском хребте с 2004 по 2016 г.

Согласно вышеописанной методике расчетов, первоначально производился отбор кондиционных данных из бюллетеней сейсмических событий. Реальный разброс времен из каталога, учитывая, что землетрясения взяты практически с одного «кластера» (см. рис. 10), не должен превышать ~ 3 с, как это показано на рис. 7 для тувинских землетрясений. На рисунке 11, а приведены сводные данные от нескольких десятков взрывов и вибраторов, полученные на профиле 1СБ, которые показывают, что реальный разброс времен P_n -волн, связанный со значительными скоростными неоднородностями по поверхности Мохоровичча в Прибайкалье и Забайкалье (см. рис. 3, 10), не должен превышать 2.5—3.0 с.

Проведенный теоретический расчет времен P_n -волн от землетрясений по модели среды на рис. 10 (для нулевых глубин гипоцентров) показывает (см. рис. 11, б), что средние различия времен P_n -волн составляют не более 2 с. Исключения составляют три времени P_n -волны с сейсмостанцией НИА на юго-востоке (с $T_{\text{ред.}} \sim 4$ с), для которых пути пробега проходят по высокой скорости по границе M (см. рис. 10). С учетом максимального разброса глубин гипоцентров от 0 до 30 км максимальный разброс времен P_n -волн в бюллетенях от разных станций в Прибайкалье и Забайкалье не должен превышать ~ 5 с (как это показано на рис. 7 для Алтай-Саянского региона), а в среднем для большинства событий составлять 2—3 с. Это и наблюдается на экспериментальном годографе (см. рис. 11, в). Отметим, что вступление P_n -волны с пониженным значением $T_{\text{ред.}} = 2.3$ с на расстоянии 834 км, так же как и на теоретическом годографе, относится к сейсмостанции НИА. В результате процедур чистки и расчета t^0 были определены глубины гипоцентров для выбранного участка на северо-востоке БРЗ (таблица).

Рассчитанные глубины гипоцентров находятся в интервале 5.6—20.3 км со среднеквадратическими отклонениями ~ 5 —7 км, что согласуется со средними оценками глубин гипоцентров Прибайкалья и Забайкалья [Голенецкий, 1977, Гилева и др., 2000; Радзиминович, 2010]. Повышенные среднеквадратические отклонения связаны с использованием нечетких вступлений P_n -волн на больших удалениях. При разбиении полученных данных на периоды до и после Муяканских землетрясений 2014 г., как это описано в [Гилёва и др., 2020], средние глубины гипоцентров будут составлять ~ 17.4 и ~ 9.8 км, что со-

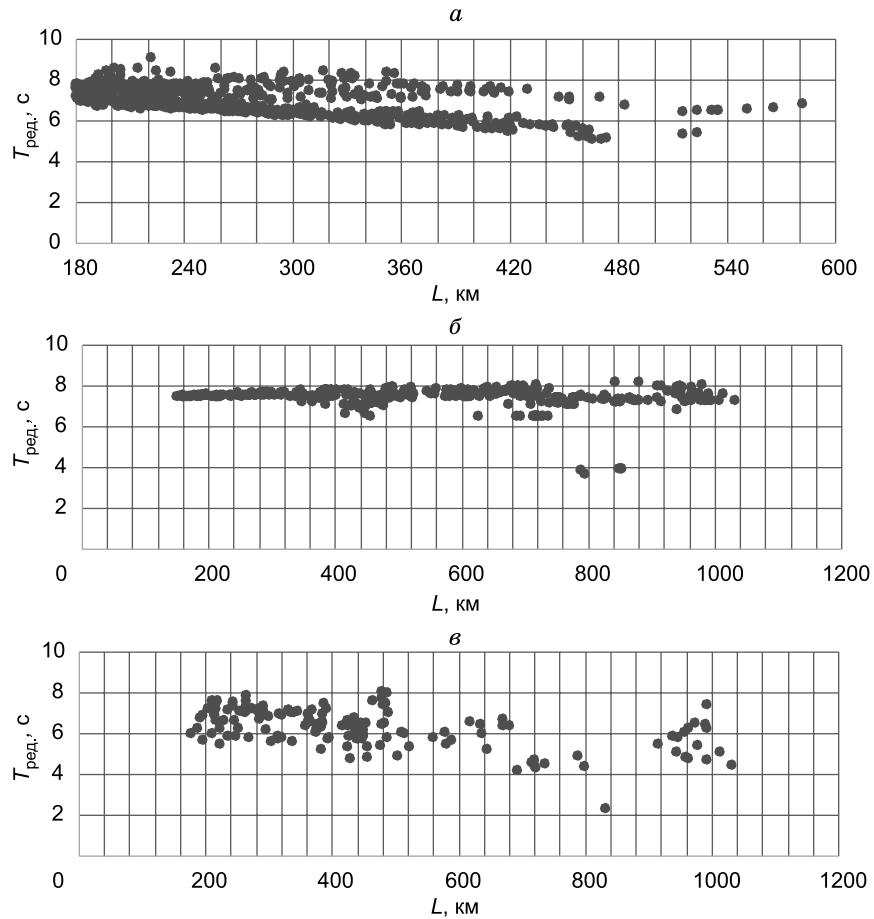


Рис. 11. Редуцированные годографы P_n -волн для Прибайкалья и Забайкалья.

а — сводный годограф от взрывов и вибраторов на профиле 1СБ; *б* — теоретический годограф от землетрясений (при глубине гипоцентров $h = 0$ км); *в* — экспериментальный годограф от землетрясений в Муйканском хребте с $K \geq 12$.

гласуется с данными региональных и детальных сейсмологических исследований на северо-востоке БРЗ [Мельникова и др., 2019; Гилёва и др., 2020]. Следует согласиться здесь с исследователями [Гилёва и др., 2021, с. 254], указывающими, что «особенности сейсмического режима и напряженно-деформированного состояния земной коры при Муйканской последовательности землетрясений в определенной степени свидетельствуют о перераспределении напряжений в земной коре и об активизации локальных разнонаправленных разрывных нарушений....». Согласно [Соловьев и др., 2023], в непосредственной близости от зоны сейсмической активизации на профиле 1СБ установлены зоны повышенной неоднородности (по параметрам v_p/v_s , коэффициент Пуассона и др.) на разных глубинах в 3—8 и 12—18 км. Вероятно, разрядка с 2014 г. происходит в менее контрастной зоне на глубинах 3—8 км, что и определяет малые глубины гипоцентров в 3—11 км [Гилёва и др., 2021]. В целом, как отмечалось выше, полученные сведения о глубинах гипоцентров Муйканских землетрясений согласуются с результатами обработки сейсмологических данных по волнам P_g и S_g [Гилёва и др., 2020]. Тем не менее было получено несколько значительных расхождений в глубинах, в том числе для главного события 23.05.2014 с $K = 14.3$. Его глубина составила, по данным P_n -волн, 12.1 ± 4.6 км (см. таблицу), в то время как по определениям различных агентств от 3 до 7 км: 3 км по оценке BAGSR, 6.4 ± 2.3 км — ISC [Гилёва и др., 2020]. Этот вопрос, на взгляд авторов, требует дальнейшего уточнения, поскольку при построении по P_n -волнам использовались в основном их четкие вступления от достаточно сильных событий, что с использованием карт граничных скоростей по границе M дает небольшой разброс рассчитанных t^0 , примерно в 1.0—1.3 с; в то же время, учитывая значительные скоростные неоднородности в верхней коре, по данным скоростей P - и S -волн, полученные на опорном профиле 1СБ [Соловьев и др., 2023], взятые при расчетах средние значения скоростей P_g - и S_g -волн в 6.15 и 3.58 км/с, при больших путях пробега могут сильно различаться по разным направлениям и давать ошибки в определении гипоцентров.

К определению гипоцентров землетрясений в Прибайкалье и Забайкалье

№ п/п	Дата	с.ш.	в.д.	K	h_r	σ_r	h	σ
		град.			км			
1	08.03.2004	56.16	114.11	12.40	18.5	8.2	20	3
2	21.03.2007	55.87	113.42	12.30	15.5	5.8	17	4
3	05.04.2007	56.07	114.56	13.40	18.9	6.1	—	—
4	23.08.2007	55.91	113.50	13.30	20.3	6.9	22	3
5	03.01.2009	56.23	113.55	12.20	11.9	4.8	9	4
6	25.06.2013	55.14	113.07	12.40	18.9	7.8	—	—
7	27.08.2013	56.31	113.19	12.70	17.8	7.4	17	3
8	23.05.2014	56.07	113.88	14.30	12.1	4.6	—	—
9	04.09.2014	56.06	113.90	12.00	9.9	6.8	10	3
10	17.10.2014	55.29	113.61	12.00	15.5	6.8	18	3
11	23.12.2014	56.05	113.88	12.40	8.3	4.9	8	2
12	03.01.2015	56.11	113.71	12.90	7.1	5.1	7	4
13	05.01.2015	56.10	113.75	13.00	6.9	5.1	5	2
14	05.01.2015	56.09	113.72	12.00	5.6	5.6	1	3
15	05.01.2015	56.14	113.70	12.50	10.3	7.6	—	—
16	18.01.2015	56.13	113.75	13.40	10.7	5.3	7	3
17	18.01.2015	56.12	113.73	13.14	10.4	4.9	9	2
18	13.03.2015	56.08	113.92	12.30	10.5	4.7	9	2
19	19.03.2015	56.12	113.74	12.20	11.9	5.0	7	2
20	17.06.2016	56.13	113.74	12.30	9.6	6.2	7	3

Примечание. K — энергетический класс; h_r , σ_r — рассчитанная глубина и ее стандартная ошибка; h , σ — по данным БФ ФИЦ ЕГС РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

С использованием полученных ранее сведений о площадном распределении граничной скорости продольных волн по поверхности Мохоровичича, глубин ее залегания и скорости в земной коре ряда сейсмоактивных зон Сибири (Алтай-Саянский регион, Прибайкалье и Забайкалье, Якутия) по временам пробега продольных преломленных волн от границы Мохоровичича (P_n -волны) определена глубина ряда ощутимых землетрясений. Тестирование алгоритма определения глубин осуществлялось на данных от афтершоков крупных тувинских землетрясений 2011—2012 гг. ($M_L = 6.7$ и 6.8). Полученные распределения гипоцентров афтершоков в целом совпадают с результатами определения глубин по данным локальной сети сейсмостанций вблизи тувинских землетрясений. Достаточно близкое совпадение разных способов определения глубин получено также по главным толчкам — землетрясениям Тувинское-1 и Тувинское-2. Полученные с использованием времен P_n -волн глубины афтершоков землетрясения Тувинское-1 дополняют результаты по данным выставленной позднее локальной сети станций и свидетельствуют о единстве тектонического процесса во всей активизированной области. В северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны на участке Муяканского хребта с использованием данных P_n -волн от землетрясений определены глубины гипоцентров двух десятков землетрясений. Полученные средние глубины гипоцентров, разбитые на периоды до и после Муяканской активизации 2014 г., различаются на ~ 7.5 км. Эти данные согласуются с материалами региональных и детальных сейсмологических исследований Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН и свидетельствуют о сложном неоднородном напряженно-деформированном состоянии в данном районе. В Якутии по границе между крупнейшими литосферными плитами отмечаются пониженные глубины гипоцентров в 6—12 км, в то время как сопредельным участкам соответствуют повышенные глубины землетрясений до 20—30 км. Ряд новых сведений о распределении глубин землетрясений в Алтай-Саянском регионе, Якутии, Прибайкалье и Забайкалье поможет уточнить положение границ плит, прояснить строение коры и мантии и процессы, протекающие в зонах сейсмических активизаций.

При дальнейших исследованиях планируется более широкое использование описанного выше способа определения глубин землетрясений для сейсмогенных зон территории Сибири и востока России, в которых слабо представлены или отсутствуют сведения о распределении гипоцентров землетрясений.

Авторы выражают признательность коллегам из Байкальского, Алтае-Саянского, Якутского и Магаданских филиалов ФИЦ ЕГС РАН, участвующим в получении экспериментальных данных по Алтае-Саянскому региону, Прибайкалью, Забайкалью и Якутии, а также за ценные замечания при обсуждении статьи.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) 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».

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. 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.

Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год» [Электронный ресурс]. СПб, ВСЕГЕИ, 2013, <https://www.vsegei.ru/ru/info/seismic/>.

Гайский В.Н., Жалковский Н.Д. Распределение очагов землетрясений разной величины в пространстве и во времени // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1972, № 2, с. 13—22.

Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж. Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (5), с. 629—636.

Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б. Муяканское-II землетрясение 23 мая 2014 г. с $K_p = 14.3$, $M_w = 5.5$, $I_0 = 7-8$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2020, вып. 23 (2014 г.). с. 323—333, doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.33.

Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Муяканская последовательность землетрясений в 2015 г. (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2021, вып. 24 (2015 г.), с. 245—257.

Голенецкий С.И. Анализ эпицентрального поля. Сейсмическая активность. Глубины очагов землетрясений Прибайкалья // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск, Наука, 1977, с. 163—184.

Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // ДАН, 2004, т. 395, № 4, с. 534—537.

Еманов А.А., Лескова Е.В. Особенности строения эпицентральной зоны Чуйского (Горный Алтай) землетрясения по данным сейсмической томографии с двойными разностями // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: материалы междунар. геофиз. конф. Новосибирск, 12—16 сент. 2005 г. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005, с. 300—303.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Гилёва Н.А., Массальский О.К. Афтершоки Тувинского-I землетрясения 27 декабря 2011 г. с $M_L = 6.7$ и Тувинского-II – 26 февраля 2012 г. с $M_L = 6.8$ (Республика Тыва) // Землетрясения Северной Евразии. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2018, вып. 21 (2012 г.), с. 302—312.

Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения, 2018, № 76, с. 9—21.

Крылов С.В. О глубинах Байкальских землетрясений и сейсмоконтролирующих факторах // Геология и геофизика, 1980 (5), с. 97—112.

Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С. Недра Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск, Наука, 1981, 105 с.

Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Блинов В.Д. Детальные глубинные сейсмические исследования в Верхнеангарском районе Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 1990 (7), с. 17—27.

Мельникова В.И., Гилева Н.А., Середкина А.И., Папкова А.А. Сброшенные и кажущиеся напряжения в очаговых зонах сильных Муяканских землетрясений ($M_w = 4.5—5.5$) в 2014—2015 гг. (Байкальская рифтовая зона) // Материалы XVII Всероссийского совещания с международным участием «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту» 15—20 октября 2019 г. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2019, № 17, с. 173—175.

Методика и аппаратура для региональных сейсмических исследований в труднодоступной местности и их применение в Сибири. Новосибирск, Наука, 1978, 204 с.

Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И., Треусов А.В. Телесейсмическая томография в Центральной Азии по волнам Р и РКР // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Труды Всерос. совещ., г. Иркутск, 26—29 авг. 2003 г. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, с. 113—117.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М., Наука, 1977, 536 с.

Радзиминович Н.А. Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // Физика Земли, 2010, № 3, с. 37—51.

Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике / Ред. Г. Нолет; пер. с англ. А.Л. Левшина, Б.Г. Букчина. М., Мир, 1990, 416 с.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Брыксин А.А. Оценка сейсмической опасности сейсмоактивных регионов Сибири // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. Тез. докл. казахстанско-российской междунар. конф. Алматы, 2004, с. 18—19.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2013, с. 30—41.

Солоненко В.П. Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт. М., Наука, 1968, с. 57—71.

Соловьев С.Л. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность. Новосибирск, Наука, 1985, 192 с.

Соловьев В.М., Селезнев В.С., Жемчугова И.В., Лисейкин А.В. Глубинное строение Алтае-Саянского региона по данным площадных сейсмологических систем наблюдений // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий: материалы междунар. геофиз. конф. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000, с. 222—228.

Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Лисейкин А.В., Сальников А.С. Глубинное строение литосферы Алтае-Саянского региона по данным промышленных взрывов, землетрясений и мощных вибрационных источников // Материалы междунар. науч.-практич. семинара «Модели строения земной коры и верхней мантии». СПб, ВСЕГЕИ, 2007, с. 201—206.

Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Шибаев С.В., Тимофеев В.Ю., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е. Особенности сейсмического строения области сочленения Евразийской и Охотоморской плит на востоке России (в створе опорного профиля ЗДВ) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (11), с. 2044—2058.

Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А., Лисейкин А.В., Галёва Н.А. Анализ глубинного скоростного строения и сейсмичности Забайкалья (в створе профиля 1-СБ). Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24—26 апреля 2019 г. // Материалы междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». В 9 т. Новосибирск, СГУГИТ, 2019, т. 2, № 2, с. 224—233.

Соловьев В.М., Селезнев В.С., Чечельницкий В.В., Галёва Н.А. Верхняя мантия Прибайкалья и Забайкалья по данным площадных сейсмологических исследований // Российский сейсмологический журнал, 2020, т. 2, № 1, с. 7—17.

Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Чечельницкий В.В., Гилёва Н.А., Лисейкин А.В., Брыксин А.А., Галёва Н.А. Глубинное скоростное строение и сейсмичность Забайкалья (в створе опорного профиля 1-СБ) // Вулканология и сейсмология, 2023, № 2, с. 1—13.

Сурков В.С., Сальников А.С., Кузнецов В.Л., Липилин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. Строение земной коры Магаданского сектора Северо-Востока России по данным ГСЗ // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным: сборник научных трудов. Новосибирск, 2007, с. 13—21.

Фатеев А.В., Филина А.Г., Кабанник А.В. Представительность и точность определения параметров эпицентров в АСОМСЭ СО РАН // Проблемы сейсмологии III тысячелетия: материалы междунар. геофиз. конф. 15—19 сент. 2003 г. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, с. 145—152.

Цибульчик И.Д. О глубинах очагов землетрясений Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика, 1996 (5), с. 170—172.

Шемякин Е.И., Щеглов В.И. К изучению механизма движения при коровых землетрясениях // Физика Земли, 1974, № 12, с. 22—31.