

V. M. Solovyev^{1}, V. V. Chechelnitskiy², A. S. Salnikov³, N. A. Galyova¹, A. E. Shenmayer¹*

О приуроченности гипоцентров землетрясений Прибайкалья и Забайкалья к крупным глубинным скоростным неоднородностям земной коры (в створе опорных геолого-геофизических профилей 1-СБ и 8-ДВ)

¹Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

*e-mail: solov@gs.nsc.ru

Аннотация. Представлен анализ глубинного строения и распределения гипоцентров землетрясений Прибайкалья и Забайкалья в створе опорных геофизических профилей 1-СБ и 8-ДВ. Установлено сложное неоднородное строение земной коры и верхней мантии по значениям скоростей упругих волн, отношениям скоростей V_p/V_s и коэффициенту Пуассона. Установлена приуроченность зон повышенной сейсмичности к блокам земной коры (на глубинах 8-20 км) с неоднородным скоростным строением по данным разнополяризованных Р-и S-волн. Прежде всего это участки Мульского землетрясения 1957 года с $M=7.6$ и Муяканских землетрясений с 2014 года в Байкальской рифтовой зоне, а также зона Балецкого землетрясения 2006 года в пределах Амурской складчатой области. Выделен в створе профиля также ряд других неоднородных глубинных зон по аномалиям сейсмических параметров, в разной степени коррелирующих с распределением гипоцентров землетрясений.

Ключевые слова: профиль ГСЗ, скорости продольных и поперечных волн, гипоцентры землетрясений, сейсмический разрез

V. M. Solovyev^{1}, V. V. Chechelnitskiy², A. S. Salnikov³, N. A. Galyova¹, A. E. Shenmayer¹*

About confinement of earthquake hypocentres of Pribaikalye and Transbaikalye to large deep velocity inhomogeneities of the Earth's crust (in the section of reference geological-geophysical profiles 1-SB and 8-DV).

¹Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Baikal Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The paper presents an analysis of the depth structure and distribution of earthquake hypocentres in Pribaikalia and Transbaikalia in the range of reference geophysical profiles 1-SB and 8-DV. The complex heterogeneous structure of the Earth's crust and upper mantle has been established in terms of elastic wave velocities, V_p/V_s velocity ratios and Poisson's ratio. The confinement of zones of increased seismicity to blocks of the Earth's crust (at depths of 8-20 km) with inhomogeneous velocity structure was established from the data of differently polarised P- and S-waves. First of all, these are the areas of the Muisk earthquake of 1957 with $M=7.6$ and the Muayakan earthquakes since

2014 in the Baikal rift zone, as well as the zone of the Baley earthquake of 2006 within the Amur folded region. A number of other inhomogeneous deep zones were also identified in the profile section in terms of anomalies of seismic parameters correlating with the distribution of earthquake hypocentres to different degrees.

Keywords: HSZ profile, longitudinal and transverse wave velocities, earthquake hypocentres, seismic section

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 глубинного строения [1, 2, 3, 4].

При изучении пространственного распределения гипоцентров землетрясений Прибайкалья и Забайкалья, которые могут коррелировать с областями готовящихся событий, исследователями отмечается большая погрешность в определении положения гипоцентров из-за редкой сети сеймостанций и отсутствия детальных сведений о строении земной коры региона [5, 6, 7, 8]. Тем не менее, в ряде работ приведены средние характеристики размещения гипоцентров этого региона, составляющие от 5 до 20 км [5, 6, 9, 10]. Более детальные данные получены, главным образом, для центральной части Байкальской рифтовой зоны с более плотным распределением сейсмологической сети и для участков с размещением детальных групп временных станций с современной регистрирующей цифровой аппаратурой в зонах сейсмических активизаций [11].

Ранее, при анализе авторами [2] данных инструментальных сейсмологических измерений 1975-1991 гг. для Прибайкалья и Забайкалья (в координатах, приведенным в ежегодных сборниках “Землетрясения в СССР” [5] установлена зависимость изменения глубинного уровня максимальной концентрации сейсмических событий от 5 км в 1975 году до 10 км в 1985 году и обратно до 5 км в 1991 году. Цикличность данного процесса может быть обусловлена рядом геолого-тектонических процессов, в том числе и миграцией зон сейсмической активности.

Анализ каталожных материалов за длительный период показывает, что «работает» то юг Байкальской впадины, то север, то центральная часть; в соответствии с эти меняются и глубины гипоцентров событий. С наличием более плотных сетей наблюдений и временных групп станций, обеспечивающих высокую точность в определении гипоцентров, стали отмечаться факты изменений глубин событий и для одних активизированных областей. Наиболее ярким примером является Муяканская активизация с 2014 года в Муяканском хребте [11]. Интенсивный афтершоковый процесс Муяканских землетрясений с 2014 по 2023 гг. [10, 11] указывает на начавшуюся разрядку этой напряженной зоны, в которой более 100 лет назад уже было крупное Северобайкальское землетрясение с $M = 6.6$ [7, 12]. Следует отметить, что до 2014–2015 гг. сейсмическая активность здесь проявлялась неравномерно. Наибольшая плотность эпицентров наблюдалась в центральной части хребта, при этом глубины гипоцентров большинства сейсмических событий распределялись в сейсмоактивном слое 17–26 км [11]. Важным от-

личием Муяканской серии землетрясений с 2014 г. от всех предыдущих активизаций явились малые глубины их гипоцентров ($h=3-11$ км), что связывается авторами с тектонической расслоенностью верхней части земной коры в районе активизации с изменением упругих модулей и плотности горных пород и это, в свою очередь, способствует разрядке напряжений в виде землетрясений средней силы) [11].

Подобные зависимости концентрации сейсмических событий в интервалах глубин 3-5 км и 8-15 км отмечены в работе для центральной Калифорнии, Узбекистана и Японии [3] и связываются авторами с физическими свойствами вещества: верхняя зона соответствует давлению, при котором закрываются поры в горных породах, а нижняя зона связывается с критическими условиями для водных растворов, содержащихся в земной коре. Эти исследования, также как и работы других авторов [6, 13] подчеркивают превалирующее влияние зон повышенных глубинных неоднородностей на концентрацию землетрясений, по сравнению с широко распространенным мнением о приуроченности сейсмических активизаций к глубинным разломам.

Особенности сейсмического режима и напряженно-деформированного состояния земной коры при Муяканской последовательности землетрясений также свидетельствуют о перераспределении напряжений в земной коре, что обуславливает необходимость в данных детальных сейсмических сведениях о строении земной коры для прогнозирования развития активизаций. Что актуально и для всей территории Прибайкалья и Забайкалья.

Земная кора и мантия Прибайкалья и Забайкалья (главным образом северо-восток БРЗ) активно изучалась глубинными сейсмическими исследованиями в 1970-1987 гг. прошлого столетия; в последнее десятилетие здесь выполнены также два ортогональных региональных геофизических профиля: 1-СБ и 8-ДВ и по данным сейсмологии и ГСЗ получено площадное распределение скоростей Р- и S-волн по поверхности Мохоровича [10, 14] (рис. 1).

Уточнено глубинное строение земной коры и верхней мантии северо-востока Байкальской рифтовой зоны и в створе профиля 1-СБ строение центральной части Забайкалья. В структурно-тектоническом плане северо-восток БРЗ включает ряд крупных и более мелких горных хребтов (Южно-Муйский, Северо-Муйский, Делюн-Уранский, Каларский, Муяканский, Удокан и Кодар) и межгорных впадин (Муйско-Кондинская, Намаркитская, Чарская), различающихся историей развития, характером сочленения и напряженного состояния. Столь разный характер разнородных тектонических структур в пределах изучаемой территории находит свое отражение и в сильном различии упругих и структурных параметров земной коры и мантии. Отмечено сильное изменение глубин залегания границы Мохоровича от 40 км во впадинах до 48 км в районе крупных хребтов. Сильно изменяются и значения граничной скорости по границе М – от повышенных значений в 8.2–8.4 км/с до 7.8-7.9 км/с для Р-волн и от 4.85 км/с до 4.5 км/с для S-волн. Сильное неоднородное строение среды по значениям скоростей упругих волн, отношениям скоростей V_p/V_s , коэффициенту Пуассона и параметру K^* (фиктивная скорость, равная $V_p/(V_p/V_s-1)$) установлено для верхней и

площади в пределах Амурской складчатой области, где в глубинном распределении параметра K^* отмечается чередование зон пониженных (менее 7.5 км/с) и повышенных (до 9 км/с и более) значений [10].

С использованием детальной информации о глубинном строении, в особенности, в створе опорного 1200-километрового геофизического профиля 1-СБ проведено исследование взаимосвязи между глубинной структурой и сейсмичностью в ряде сейсмогенных зон территории Прибайкалья и Забайкалья (рис. 2).

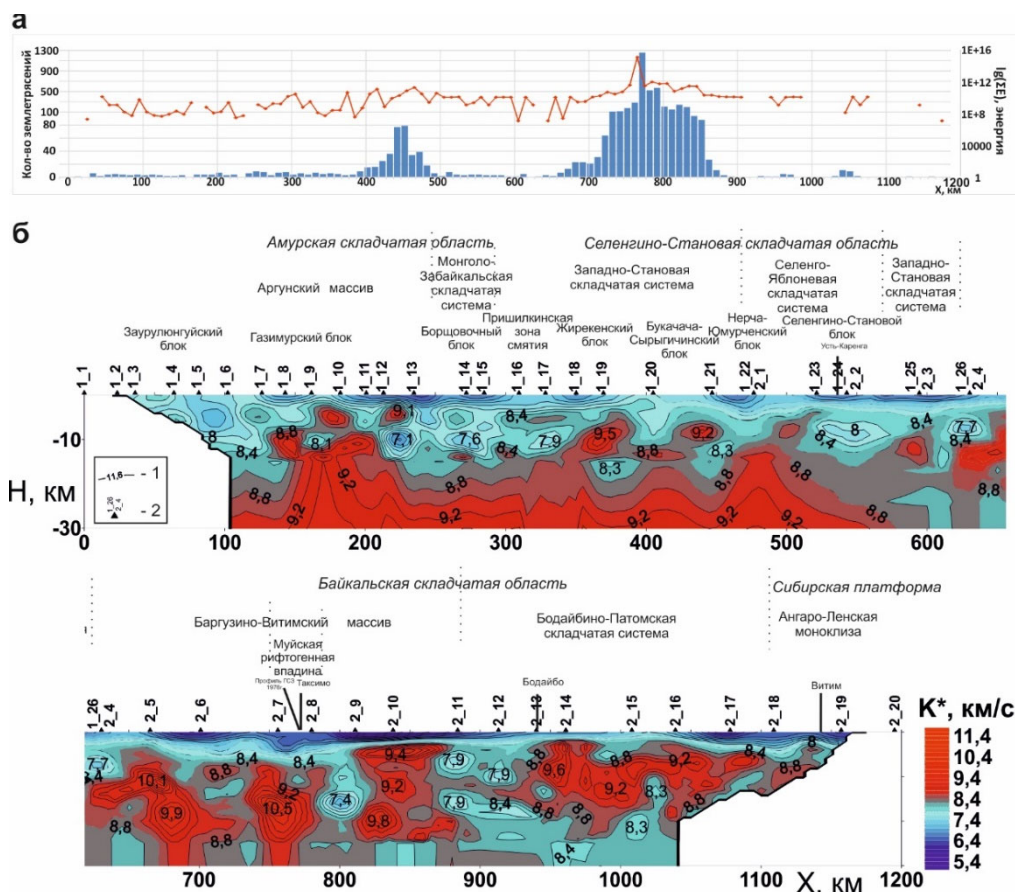


Рис. 2. К анализу сейсмичности и глубинного строения на профиле 1-СБ. а – график количества землетрясений с магнитудой от 1.4 до 6.2 в 50-километровой полосе профиля 1-СБ за инструментальный (40-летний) период наблюдений (голубым цветом) и график выделенной сейсмической энергии ($Lg\Sigma E$) (красным цветом); б – распределение параметра $K^* = V_p/(\gamma-1)$ (где $\gamma = V_p/V_s$) в земной коре на профиле 1-СБ. 1 – изолинии параметра K^* , в км/с; 2 – источники возбуждения

На участке пересечения профиля 1-СБ с профилем ГСЗ 1983 г. выделен блок с повышенными значениями упругих параметров и модуля сдвига, пониженными значениями отношений V_p/V_s и коэффициента Пуассона, повышенными значениями параметра K^* , который рассматривается как накопитель упругой потенциальной энергии, которая может разряжаться на краях (Рис. 2). Именно в

восточном его ограничении, в перемычке Муйско-Кондинской и Намаркитской впадин, произошло крупнейшее Муйское землетрясение 1957 г. с магнитудой 7.6. Земная кора этого участка спустя более полувека после землетрясения находится в напряженном состоянии, о чем свидетельствует значительное количество регистрируемых землетрясений (Рис. 2а).

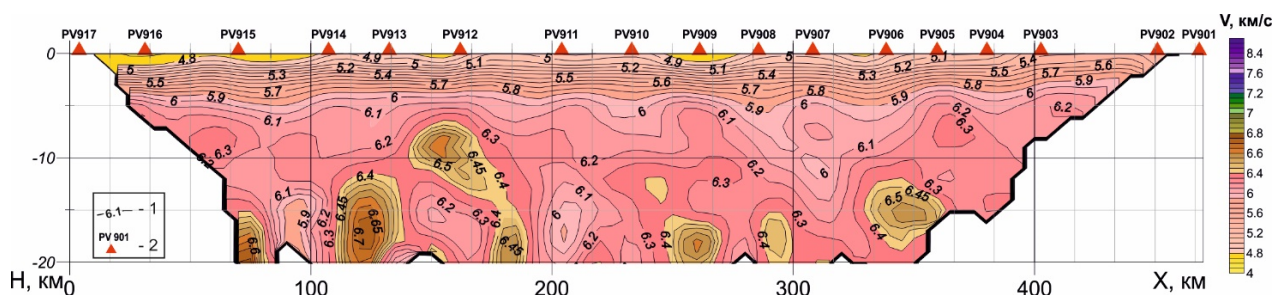


Рис. 3. Сейсмический разрез в изолиниях скорости по фрагменту 9 опорного профиля 8-ДВ

Кроме того, в непосредственной близости (25-30 км) от зоны землетрясения на профиле 8-ДВ (2020 г.) в районе Куанды на глубинах 7-11 км выделяется высокоскоростной блок с значениями скоростей продольных волн до 6.5-6.6 км/с при скоростях в 6.0-6.1 км/с на сопредельных участках (Рис. 3). Контраст скоростной аномалии по Р-волнам здесь более сильный, чем на профиле ГСЗ 1983 г. непосредственно в зоне Муйского землетрясения, составляющий 6.1-6.3 км/с. Возможными объяснениями могут быть как наличие ряда распределенных по площади значительных скоростных неоднородностей в земной коре северо-востока БРЗ, так и новым повышением напряженного состояния в зоне Муйского землетрясения после периода релаксации.

Контраст сейсмических аномалий на профиле 1-СБ в северо-западном ограничении выделенного блока (с повышенными значениями упругих параметров, модуля сдвига, K^* , пониженными значениями V_p/V_s и σ), более сильный, чем на участке Муйского землетрясения (в период 1973 г.), что может свидетельствовать о повышенном здесь напряженном состоянии и может привести к крупнейшему землетрясению. Интенсивный афтершоковый процесс Муяканских землетрясений с 2014 по 2021 гг. указывает на начавшуюся разрядку этой напряженной зоны, в которой более 100 лет назад уже было крупное Северобайкальское землетрясение с $M = 6.6$. На профиле 8-ДВ (2020 г.) вблизи от зоны Муяканских землетрясений (с 2014 года) также отмечается скоростная неоднородность в коре на глубинах 7-10 км (с изменениями скоростей Р-волн от 6.1 до 6.3 км/с), пространственно совпадающая с средними глубинами афтершоков землетрясений [11]. Повышенная скоростная неоднородность (с изменениями скоростей Р-волн от 6.0 до 6.6 км/с) отмечается в этой зоне и на больших глубинах (в 15-20 км, рис. 3), что коррелирует с данными сейсмологических исследований, указывающих на активизацию разных зон в пределах Муяканского хребта [11].

Чрезвычайно неоднородной является юго-восточная часть профиля 1-СБ (Заурулюнгуйский и Газимурский блоки, $X=20-260$ км на рисунке 2б), где в глубинном распределении параметра K^* отмечается чередование зон пониженных (менее 7.5 км/с) и повышенных (до 9 км/с и более) значений.

Из графиков на рис. 2а следует также, что даже при малом количестве событий в южной части площади выделенная сейсмическая энергия достаточно ощутима. Высокая контрастность зоны ($X = 210-260$ км) в параметрах V_p/V_s , σ и K^* на глубинах 7-12 км (рис. 2б, [10]), а также регистрация в районе Борщовочного хребта БалеЙского землетрясения с $M = 4.7$ на глубине по разным оценкам от 7 до 12 км [16] указывают на вероятность возникновения сильных землетрясений и в других малосейсмичных зонах, где по сейсмическим данным отмечены значительные неоднородности в верхней части земной коры. Подобный факт возникновения сильных землетрясений при в целом слабой и умеренной сейсмичности территории ранее отмечен был исследователями и для Западного Забайкалья [16].

К таким “потенциально сейсмичным” зонам, кроме выделенных выше областей с повышенной сейсмичностью, можно отнести участки $X = 260-290$ км (в пределах Борщовочного хребта), $X = 320-380$ км (в пределах Шилкинского хребта), $X = 610-650$ (Витимское плоскогорье), $X = 1000-1040$ км (северо-восток Бодайбино-Патомской складчатой системы) (см. рис. 2б).

Выводы

Полученная новая дополнительная информация о глубинном строении слабо-изученной глубинными сейсмическими исследованиями территории Прибайкалья и Забайкалья свидетельствует о значительных сейсмических неоднородностях в земной коре с контрастом сейсмических аномалий до 40%, к которым приурочены крупные землетрясения и сейсмические активизации (участки Муйского землетрясения 1957 г., вблизи Муяканских землетрясений с 2014 г., БалеЙского землетрясения 2006 г.), что может свидетельствовать о повышенном здесь напряженном состоянии и при дальнейшей разрядке здесь возможны новые крупные землетрясения.

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».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гайский В.Н., Жалковский Н.Д. Распределение очагов землетрясений разной величины в пространстве и во времени // Изв. АН СССР. Физика Земли. -1972. -N2. С. 13-22.
2. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. К обоснованию постановки вибросейсмического мониторинга юго-западной части Байкальской рифтовой зоны // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы: Материалы междунар.конф. 6-13 сент. 1998.- Новосибирск: Изд-во ОИГГиМ СО РАН, 1998.- С. 105-110.

3. Шемякин Е.И., Щеглов В.И. К изучению механизма движения при коровых землетрясениях // Физика Земли.- 1974.- N12.- С. 22-31.
4. Нолет Г. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике. Пер. с англ. –М.: Мир, 1990.-416 с.
5. Землетрясения в СССР в 1976 –1991 гг., М, 1976-1991 гг.
6. Крылов С.В. О глубинах байкальских землетрясений и сейсмоконтролирующих факторах.- Геол. и Геофиз., 1980, N5, с. 83-97.
7. Сейсмичность и глубинное строение Прибайкалья, Новосибирск, Наука, 1978, 174 с.
8. Голенцкий С.И. Анализ эпицентрального поля. Сейсмическая активность. Глубины очагов землетрясений Прибайкалья // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1977.
9. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 536 с.
10. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С. и др. Глубинное скоростное строение и сейсмичность Забайкалья (в створе опорного профиля 1-СБ) // Вулканология и сейсмология. 2023, N2, с. 1-13.
11. Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б. Муяканское-II землетрясение 23 мая 2014 г. с $KP=14.3$, $M_w=5.5$, $I_0=7-8$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 323–333.
12. Соловьев С.Л. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность. Новосибирск: Наука, 1985. 192 с.
13. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах.- Новосибирск: Наука, 1993. –199 с.
14. 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.
15. Солоненко В.П. Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт. М.: Наука, 1968. С. 57-71.
16. Я.Б. Радзиминович, В.И. Мельникова, А.И. Середкина, и др. Землетрясение 6 января 2006 г. ($M_w = 4.5$): редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 10, с. 1430-1444.

© В. М. Соловьев, В. В. Чечельницкий, А. С. Сальников,
Н. А. Галёва, А. Е. Шенмайер, 2024