

АНАЛИЗ ГЛУБИННОГО СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАБАЙКАЛЯ (В СТВОРЕ ПРОФИЛЯ 1-СБ)

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Александр Сергеевич Сальников

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, доктор геолого-минералогических наук, зав. отделом сейсморазведки, тел. (383)230-94-76, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Владимир Васильевич Чечельницкий

Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (3952)42-74-90, e-mail: chechel@crust.irk.ru

Надежда Алексеевна Гилева

Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, начальник отдела сбора и обработки сейсмологической информации, тел. (3952)51-12-31, e-mail: nagileva@crust.irk.ru

Алексей Владимирович Лисейкин

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, тел. (383)333-20-21, e-mail: lexik1979@mail.ru

Наталья Александровна Галёва

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Представлен анализ сейсмичности и глубинного строения Забайкалья в створе профиля 1-СБ. Установлена приуроченность зон повышенной сейсмичности к блокам земной коры с неоднородным скоростным строением по данным разнополяризованных *P*-и *S*-волн. Повышенной неоднородностью в верхней части земной коры по данным скоростей упругих волн и вторичных параметров среды характеризуется район Байкальской рифтовой зоны, в непосредственной близости от крупнейшего Муйского землетрясения 1957 года с $M=7.6$.

Ключевые слова: профиль ГСЗ, скорость продольных и поперечных волн, коэффициент Пуассона, сейсмичность, Байкальская рифтовая зона.

ANALYSIS OF THE DEEP SEISMIC STRUCTURE AND SEISMICITY OF THE TRANSBAIKALIA (ALONG THE 1-SB PROFILE)

Victor M. Solovyev

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptug, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Deputy Director, phone: (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Alexander S. Salnikov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 67, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Seismic Prospecting Department, phone: (383)230-94-76, e-mail: seispv@sniiggims.ru

Viktor S. Seleznev

Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptug, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Director, phone: (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Vladimir V. Chechelnitsky

Baikal Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, Ph. D., Deputy Director, phone: (3952)42-74-90, e-mail: chechel@crust.irk.ru

Nadezhda A. Gilyova

Baikal Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, Head of Department, phone: (3952)51-12-31, e-mail: nagileva@crust.irk.ru

Aleksey V. Liseikin

Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptug, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: (383)333-20-21, e-mail: lexik1979@mail.ru

Natalya A. Galyova

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptug, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

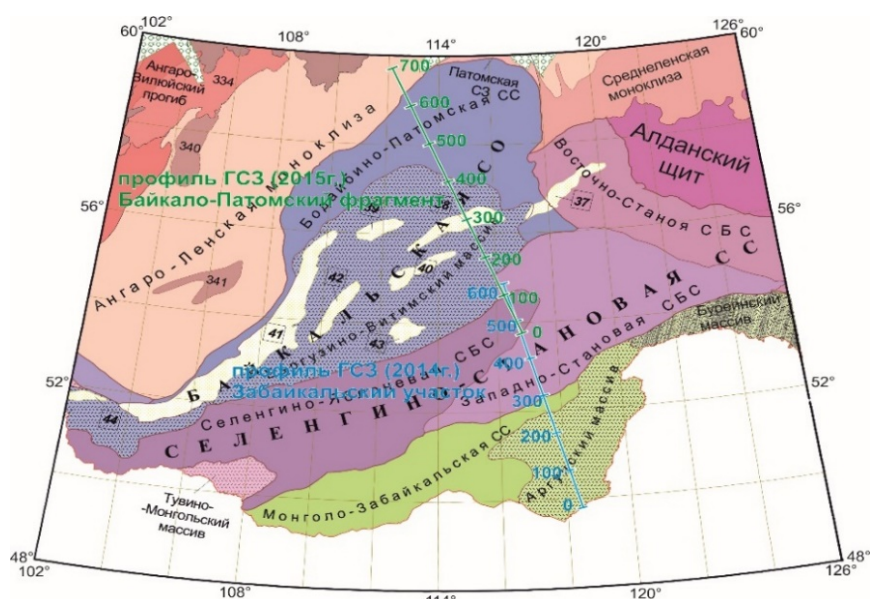
An analyzing on the seismicity and the deep structure of Transbaikalia along the 1-SB profile is presented. Determined that areas of high seismicity associated with the blocks of the Earth's crust with a heterogeneous velocity structure. The site of the Baikal rift zone which is located in close proximity to the Muya earthquake (1957, $M=7.6$) is characterized by increased heterogeneity according to the values of P- and S-waves and of elastic parameters in the Earth's crust upper part.

Key words: deep seismic sounding, velocity of P- and S-waves, Poisson's ratio, seismicity, Baikal rift zone.

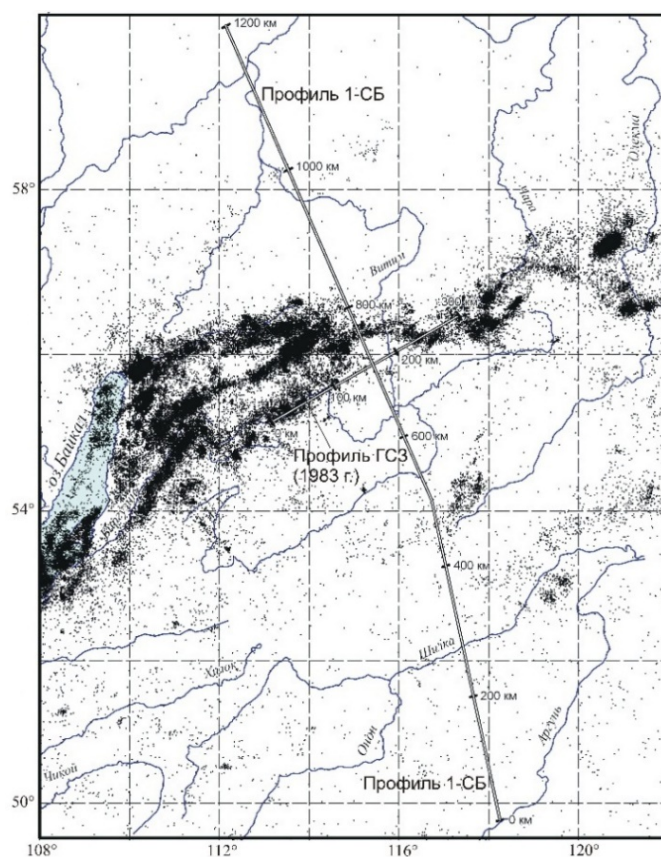
Введение

Площадь исследований охватывает юго-восточную часть Забайкалья и Северное Прибайкалье. В структурно-тектоническом плане она находится в пределах крупных тектонических структур Центрально-Азиатского складча-

того пояса (рис. 1, а). Сейсмичность Забайкалья по данным инструментальных измерений (рис. 1, б) определяется как умеренная и слабая [1, 11].



а)



б)

Рис. 1. Схема тектонического районирования согласно [12] (а) и карта эпицентров землетрясений с $Kp \geq 6.6$ за 40 лет с 1975-2014 гг. (б) в полосе опорного профиля 1-СБ (Восточный участок)

Всего за последние 60 лет сейсмологи зафиксировали в Забайкалье 18 сильных землетрясений с магнитудой свыше 4.5. Наиболее сейсмичной является северная часть Забайкалья (и Северного Прибайкалья) в пределах Байкальской рифтовой зоны, где в 1957 году произошло крупнейшее землетрясение для всей территории Прибайкалья и Забайкалья – Муйское землетрясение с магнитудой 7.6 и интенсивностью сотрясений 10 баллов. Северо-Муйский район в Северном Прибайкалье в настоящее время является одним из самых сейсмоактивных, в котором ежегодно регистрируются до 800 землетрясений с энергетическим классом $Kp \geq 6$ и средними глубинами землетрясений в 5-15 км. Земная кора этого региона находится в условиях растяжения. Что касается восточной и южной части площади исследований, сильные ощутимые землетрясения на них происходят достаточно редко и потому пристально изучаются. К одним из таких землетрясений относится Балейское землетрясение 2006 года с $M = 4.7$ вблизи г. Балей Забайкальского края, которое охватило значительную площадь и было зарегистрировано всеми станциями сети БФ ФИЦ ЕГС РАН. Большинство землетрясений приурочено к неоднородностям физико-механических свойств среды [3, 10, 11]. Отсутствие детальной геофизической и, прежде всего, сейсмической информации о сейсмоактивной среде делает, зачастую практически невозможной предсказание развития сейсмических процессов в активизированных зонах.

Ниже, в створе опорного 1200 километрового геофизического профиля 1-СБ, проходящего через тектонические структуры Забайкалья и Северного Прибайкалья проведен анализ связи сейсмичности с геофизическими параметрами, характеризующими неоднородную земную кору.

Особенности глубинного сейсмического строения на опорном геофизическом профиле 1-СБ

Профиль 1-СБ (Восточный участок) является одним из опорных геолого-геофизических профилей, выполняемых Роснедра на территории России, включающий методы ОГТ, КМПВ, ГСЗ, МТЗ и др., направленные на изучение крупных металлогенических провинций Восточного Забайкалья и системное обновление фундаментальной геолого-геофизической информации о строении и динамике недр. Полевые исследования ГСЗ на профиле 1-СБ отличает высокая детальность наблюдений (пункты взрыва через 25-45 км, станции с вертикальными приборами через 5-8 км, с трехкомпонентными приборами через 20 км). Длина годографов продольных волн достигает 300-400 км. Основные положения интерпретации экспериментальных сейсмических данных и ряд результатов изложены в работах [6-8], потому ниже представлены только главные результаты, относящиеся к исследуемой теме о связи сейсмичности Забайкалья и Прибайкалья с неоднородностями в земной коре, установленные по сейсмическим данным на профиле 1-СБ.

Анализ сейсмичности на рис. 2, а показывает, что около 85% землетрясений (в 50-ти километровой полосе профиля было выделено 4800 землетрясений

с энергетическим классом от 6.6 до 15.1) приходится на участок 670-820 км в пределах Байкальской рифтовой зоны. Высокой сейсмичностью отличается также участок $X=420-520$ км. Из графика выделенной энергии на рис. 2, а следует, что даже при малом количестве событий в южной части площади выделенная энергия достаточно ощутима.

Поверхность Мохоровичича расположена на глубинах ~ 40 км в юго-восточной половине профиля и от 40 до 48 км в северо-западной половине профиля (рис. 2, б, в). Под крупными хребтами (Южно-Муйским, Северо-Муйским и Делюн-Уранским) мощность земной коры повышена до 45-48 км. Эффективная скорость распространения сейсмических волн до границы M по данным отраженных продольных и поперечных волн составляет соответственно 6.4-6.5 км/с и 3.65-3.75 км/с.

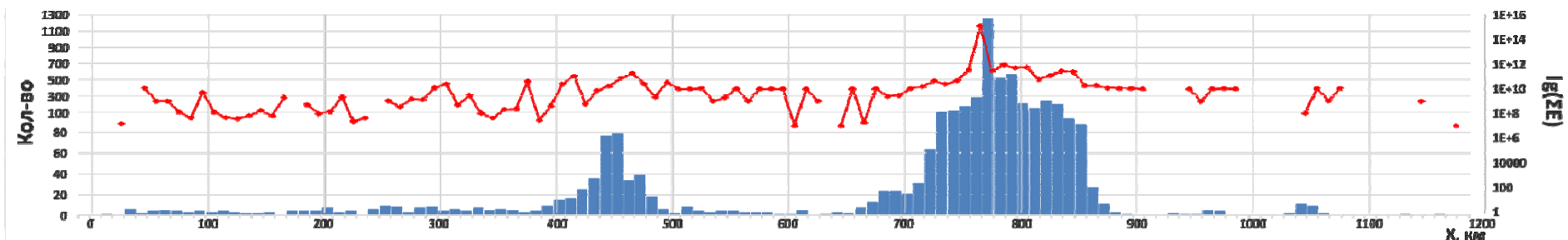
Граничная скорость продольных волн по поверхности Мохоровичича имеет повышенные значения в 8.40 ± 0.15 км/с в юго-восточной половине профиля и в центральной части Баргузинского массива в пределах Муйской глыбы ($X = 745-805$ км) в северо-западной половине профиля (рис. 2, б).

Пониженные значения граничной скорости P -волн от границы M в 7.8-8.0 км/с отмечены в области сочленения Байкальской и Бодайбинско-Патомской складчатых областей ($X = 825-945$ км). На других участках установлены нормальные значения граничной скорости продольных волн в 8.1 ± 0.1 км/с (рис. 2, б). В целом, полученное распределение граничной скорости на профиле 1-СБ коррелирует с площадным распределением граничной скорости по материалам ГСЗ 70-80-ых годов прошлого столетия [2, 4, 5] и площадными сейсмологическими исследованиями в пределах Забайкалья [8].

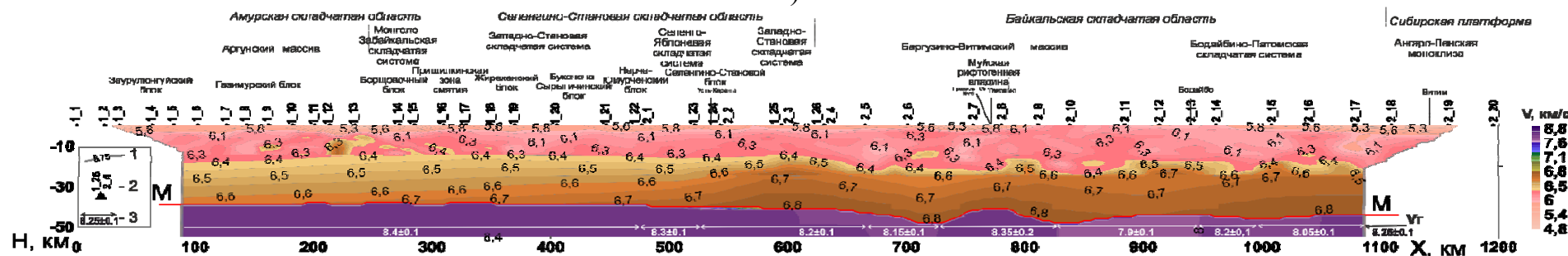
Граничная скорость S -волн имеет повышенные значения в 4.85-4.95 км/с в юго-восточной части профиля 1-СБ (рис. 2, в). В северо-западной части граничная скорость S -волн по границе M в целом изменяется от 4.6 км/с до 4.9 км/с. Более высокие значения скорости S -волн (более 4.7 км/с) отмечаются в пределах Баргузинского массива (особенно в районе Муйской глыбы) и в северо-западной части Бодайбинско-Патомской складчатой области (рис. 2, в). Пониженные значения граничной скорости S -волн по границе M в 4.6 км/с отмечены в области сочленения Байкальской и Бодайбинско-Патомской складчатых областей, Станового блока и Баргузинского массива (рис. 2, в).

Чрезвычайно неоднородной по распределению скоростей P - и S -волн является верхняя часть земной коры до глубин 10-15 км (рис. 2, б, в). На глубинах 5-15 км в пределах профиля выделяется несколько высокоскоростных блоков со скоростями P - и S -волн соответственно в 6.3-6.5 км/с и 3.65-3.75 км/с и зоны пониженной скорости P - и S -волн соответственно в 6.0-6.1 км/с и 3.4-3.5 км/с (рис. 2, б, в).

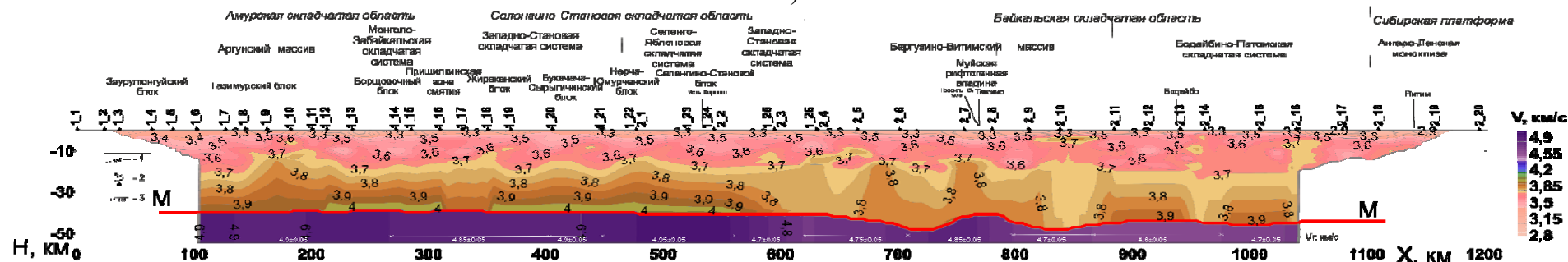
По соотношению скоростей P - и S -волн в верхней коре профиля явно выделяются значительные участки пониженных значений отношений V_p/V_s в 1.60-1.70 и повышенных отношений V_p/V_s в 1.75-1.8. Аналогично отношению скоростей P - и S -волн (но менее контрастно) установлено распределение значений коэффициента Пуассона (σ).



а)



б)



в)

Рис. 2. К анализу сейсмичности и глубинного строения на профиле 1-СБ, Восточный участок:

а) график количества землетрясений с энергетическим классом от 6.6 до 15.1 в 50-ти километровых полосе профиля 1-СБ за инструментальный (40-летний) период наблюдений (голубым цветом) и график выделенной сейсмической энергии ($\text{Lg}\Sigma E$) (красным цветом); б), в) – глубинные сейсмические разрезы по данным продольных и поперечных волн. 1- изолинии скорости, в км/с; 2 – источники возбуждения (1-Забайкальский фрагмент, 2-Байкало-Патомский фрагмент на рис. 1А); 3 – значения граничной скорости по границе Мохоровичича, в км/с

К анализу сейсмичности в створе профиля 1-СБ

С использованием полученной в пределах профиля сейсмической информации по данным разнополяризованных P - и S -волн проведен анализ аномалий в распределении упругих параметров и сейсмичности (по данным многолетних наблюдений, рис. 1Б) вдоль профиля. Достаточно информативным по изучению зон неоднородностей в верхней части разреза, наряду с упругими модулями и коэффициентом Пуассона [3, 10], является также параметр $K^* = V_p/(\gamma - 1)$, где $\gamma = V_p/V_s$, связанный со скоростями P - и S -волн. В сейсмологии этот параметр называется фиктивной скоростью. Детальный анализ площадного распределения параметра K^* в Алтае-Саянском регионе и в ряде участков Забайкалья показал на высокую его информативность при исследовании неоднородностей в земной коре, к границам неоднородных блоков которых концентрируются крупнейшие землетрясения [9]. Распределение параметра K^* по профилю 1-СБ (рис. 3) для верхней части земной коры показывает, что чрезвычайно неоднородной является земная кора области сочленения Восточно-Забайкальской складчатой области и Монголо-Охотского пояса, Саяно-Байкальской складчатой области, северо-западной части Баргузинского массива Байкальской складчатой области и юго-восточной части Бодайбинско-Патомской складчатой области, где в глубинном распределении параметра K^* (на глубинах 5-20 км) отмечается чередование зон пониженных (до 7.4-8 км/с) и повышенных (до 9.8 км/с и более) значений. Достаточно контрастными выглядят эти зоны и в отношении скоростей V_p/V_s и значениях коэффициента Пуассона. Наиболее сейсмичной является зона $X=670$ -820 км, в структурно-тектоническом плане являющаяся Байкальской рифтовой зоной с повышенной сейсмичностью, что подтверждается материалами сейсмологических наблюдений (см. рис. 1, б) [1, 11]. В непосредственной близости от профиля (~ 70 км) на этом участке в 1957 году произошло крупнейшее Муйское землетрясение с магнитудой 7.6 [1].

Выраженной локальной сейсмичностью, хотя и менее сильной, чем в рифтовых впадинах, отмечаются также участки в Саяно-Байкальской и Бодайбинско-Патомской складчатых областях; слабо сейсмична зона Борщовочного и Газимурского хребтов (см. рис. 1, б). Однако высокая контрастность рассматриваемой зоны ($X=210$ -230 км) в параметрах V_p/V_s , σ и K^* , а также регистрация в районе Борщовочного хребта Балейского землетрясения (с $M = 4.7$) указывают на вероятность возникновения сильных землетрясений и в других малосейсмичных зонах, где по сейсмическим данным отмечены значительные неоднородности в верхней части земной коры. 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 области).

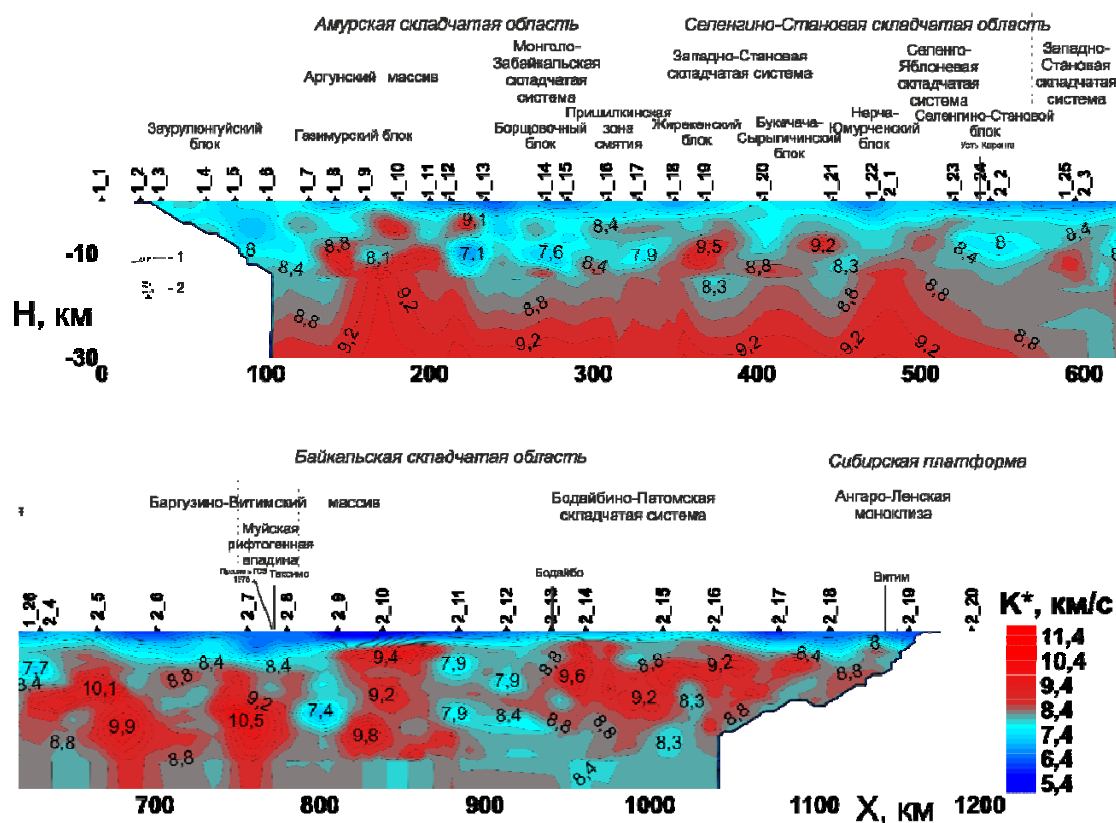


Рис. 3. Распределение параметра $K^* = V_p/(\gamma - 1)$ (где $\gamma = V_p/V_s$) в земной коре и верхней мантии на профиле 1-СБ (Восточный участок): 1 – изолинии параметра K^* , в км/с; 2 – источники возбуждения (1-Забайкальский фрагмент, 2-Байкало-Патомский фрагмент).

Детальные сейсмические исследования 70-80-ых годов прошлого столетия в Муйском регионе установили, что и спустя два десятилетия после Муйского землетрясения земная кора находится в напряженном состоянии; выявлено ее неоднородное строение по параметрам: мгновенная прочность на сдвиг, упругая энергоемкость, коэффициент Пуассона, отношение скоростей P - и S - волн [3, 5]. Значительный контраст отмечается также и по рассчитанному параметру K^* на профиле ГСЗ 1983 г (рис. 1, б), что еще раз подтверждает его информативность как вторичного параметра при анализе сейсмогенных зон.

Выводы

По результатам глубинных сейсмических исследований на опорном геофизическом профиле 1-СБ определены особенности глубинного строения земной коры и верхней мантии территории Забайкалья. По данным разнополяризованных P - и S -волн рассчитан ряд вторичных параметров, характеризующих неоднородную упругую среду. По результатам анализа сейсмичности и глубинного строения установлена приуроченность зон повышенной сейсмичности к блокам земной коры с неоднородным скоростным строением. Повышенной неоднород-

ностью в верхней части земной коры по данным скоростей упругих P - и S -волн, отношению V_p/V_s , коэффициенту Пуассона и параметру $K^* = V_p/(\gamma - 1)$, где $\gamma = V_p/V_s$ в створе профиля, характеризуется район Байкальской рифтовой зоны, в том числе и находящийся в непосредственной близости район крупнейшего Муйского землетрясения 1957 года с $M=7.6$. Выделен в створе профиля также ряд других неоднородных глубинных зон по данным скоростей P - и S -волн и вторичных параметров среды, в разной степени коррелирующих с выделенными зонами сейсмичности по данным многолетних инструментальных наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность / Отв. ред. С.Л. Соловьев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1985. – 192 с.
2. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г. В., Селезнев В. С. // Изд. Наука, 1981. – 105 с.
3. Детальные сейсмические исследования литосферы на P - и S - волнах / Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф., Тен Е.Н., Кульчинский Ю.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д. // Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. – 199с.
4. Детальные глубинные сейсмические исследования в Верхнеангарском районе Байкальской рифтовой зоны / Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Елинов В.Д. // Геология и геофизика. – 1990. – Т. 31., № 7. – С. 17-27.
5. Изучение земной коры и верхней мантии в Байкальской рифтовой зоне методом глубинного сейсмического зондирования / Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М. // Физика Земли. – 1999. – №7-8. – С.74-93.
6. Особенности сейсмического строения структур Забайкальской части Центрально-Азиатского складчатого пояса в створе опорного геофизического профиля 1-СБ / Соловьев В. М., Селезнев В. С., Сальников А. С., Лисейкин А. В., Романенко И. Е., Елагин С. А., Шенмайер А. Е. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 234–238.
7. Глубинные сейсмические исследования на Байкало-Патомском фрагменте Восточного участка опорного профиля 1-СБ / Соловьев В. М., Селезнев В. С., Сальников А. С., Лисейкин А. В., Романенко И. Е., Елагин С. А., Галёва Н. А. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 3. – С. 106–112.
8. Особенности скоростного строения верхней мантии Забайкалья на участке Монголо-Охотского орогенного пояса / Соловьев В.М., Чечельницкий В.В., Сальников А.С., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Галёва Н.А. // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8, N 4. – С. 1065–1082 doi:10.5800/GT-2017-8-4-0333.
9. Глубинное строение литосферы Алтае-Саянского региона по данным промышленных взрывов, землетрясений и мощных вибрационных источников / Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Лисейкин А.В., Сальников А.С. // «Модели строения земной коры и верхней мантии», Международный научно-практический семинар. ВСЕГЕИ. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 201-206.

10. Деформационно-прочностное районирование земной коры Алтае-Саянской складчатой области / Соловьев В. М., Селезнев В. С., Дучков А. Д., Лисейкин А. В. // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Международная конференция. – Новосибирск, 2003. – С. 332-337.

11. Солоненко В.П. Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны. – В кн.: Байкальский рифт. – М.: Наука, 1968, с. 57-71.

12. Фрагмент цифровой тектонической (геолого-структурной) карты России м-ба 1:2500000 (Гл. ред. О.В. Петров, А.Ф. Морозов. Отв. ред. С.И. Стрельников). ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003 г.

*© В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. С. Селезнев, В. В. Чечельницкий,
Н. А. Гилева, А. В. Лисейкин, Н. А. Галёва, 2019*