

УДК 550.344

## НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

© 2014 г. Ю. Ф. Копничев<sup>1</sup>, И. Н. Соколова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995 ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Б. Грузинская, 10, e-mail: yufk@kndc.kz

<sup>2</sup>Институт геофизических исследований НЯЦ РК  
050020 Алма-Ата, ул. Чайкиной, 4, РК, e-mail: sokolova@kndc.kz

Поступила в редакцию 25.10.2012 г.

Приведены результаты исследования неоднородностей поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Обработаны записи землетрясений, полученные станцией Улан-Батор (ULN) на эпицентральных расстояниях ~400–1300 км. Рассмотрены отношения максимальных амплитуд в группах Sn и Pn. Показано, что в целом величины этих отношений в районе БРЗ значительно выше, чем в других районах Центральной Азии. Установлено, что очаговым зонам сильных землетрясений, произошедших в XIX–XX веках, соответствуют зоны слабого поглощения S-волн. Выделены зоны высокого поглощения, в которых не происходило сильных сейсмических событий с  $M \geq 7.0$  по крайней мере в течение 180 лет. Предполагается, что в этих зонах могут идти процессы подготовки сильных землетрясений. Обсуждаются причины корреляции характеристик поля поглощения с сейсмичностью.

DOI: 10.7868/S0203030614050058

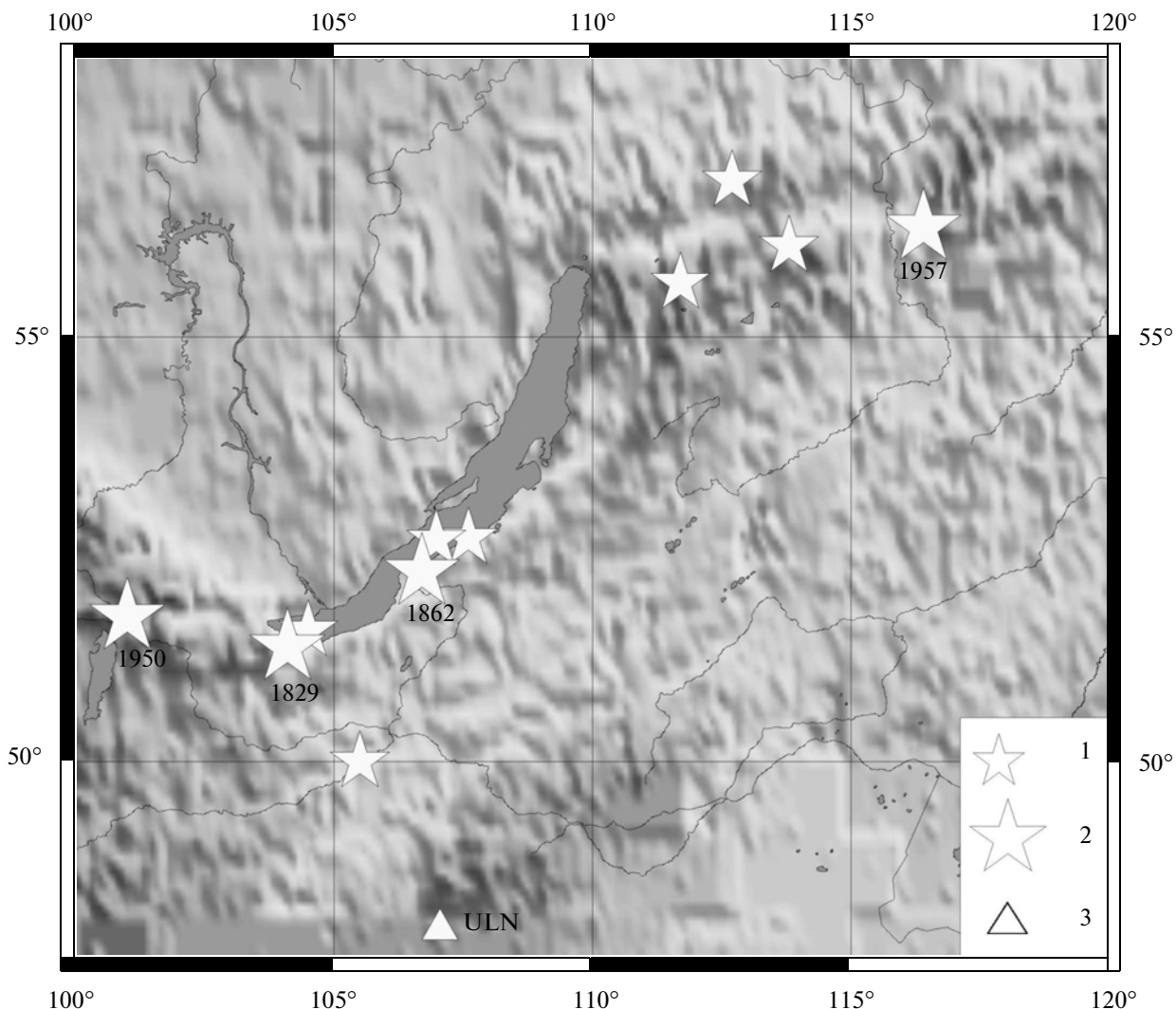
В работах [Копничев, Соколова, 2003, 2010а, б, 2011, 2012; Копничев и др., 2009, 2012] показано, что с очаговыми зонами ряда сильных землетрясений в регионе Центральной Азии, произошедшими в конце XX-го и начале XXI-го века, связаны аномалии относительно высокого поглощения короткопериодных поперечных волн. В то же время очаговым зонам событий, произошедших в начале и середине XX-го века, как правило, соответствует сравнительно слабое поглощение S-волн. Это позволяет использовать

информацию о неоднородностях поля поглощения для выделения зон подготовки будущих сильных землетрясений в континентальных районах. Ниже рассматриваются характеристики поля поглощения в районе Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и проводится их сопоставление с сейсмичностью.

Начиная с 1800 г., в районе БРЗ произошло 4 сильных землетрясения с  $M \geq 7.0$  (рис. 1, таблица). Кроме того, с начала XX-го века здесь зарегистрировано 7 событий с  $6.5 \leq M < 7.0$  [Новый

Сильные землетрясения в районе БРЗ

Год	Мес.	День	Широта, ° N	Долгота, ° E	M
1829	3	7	51.4	104.1	7.5
1862	1	12	52.3	106.7	7.5
1902	4	11	51.6	104.5	6.6
1902	8	17	56.7	112.7	6.5
1903	11	26	52.7	107.6	6.7
1917	4	29	56.0	113.8	6.6
1937	12	25	55.6	111.7	6.5
1950	4	4	51.77	101.0	7.0
1957	2	6	50.0	105.5	6.5
1957	6	27	56.2	116.4	7.6
1959	8	29	52.68	106.98	6.8



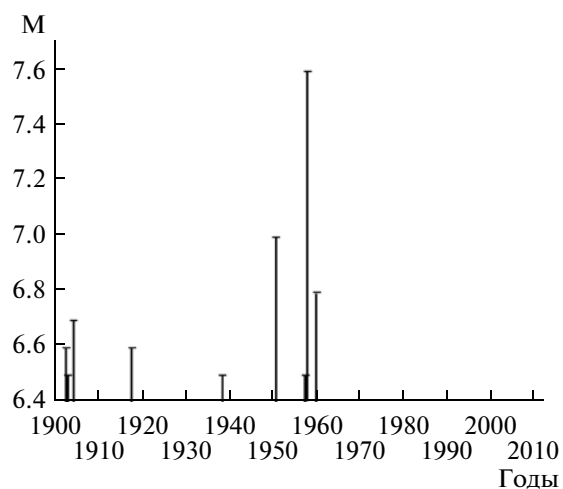
**Рис. 1.** Эпицентры сильных землетрясений в районе БРЗ (к северу от 50° N). 1 – 6.5 ≤ M < 7.0 (с 1900 г.), 2 – M ≥ 7.0 (с 1800 г.). 3 – сейсмическая станция.

каталог..., 1977]. Последнее из этих землетрясений (Средне-Байкальское, M = 6.8) произошло еще в 1959 г.

При этом все сильные сейсмические события, произошедшие в XX-м веке, группируются в две относительно короткие серии длительностью 15 лет и 22 года (1902–1917 и 1937–1959 гг.) (рис. 2). После 1959 г. здесь не зарегистрировано землетрясений с M > 6.3. Учитывая эти данные, можно предполагать, что в рассматриваемом районе идет подготовка нескольких достаточно сильных сейсмических событий.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Были обработаны записи землетрясений, полученные в 1994–2012 гг. станцией Улан-Батор (ULN) на эпицентральных расстояниях ~400–1300 км. Всего проанализировано около 150 сей-



**Рис. 2.** Сильные землетрясения в районе БРЗ и их магнитуды в период 1900–2010 гг.

смограмм событий с  $4.0 \leq M < 6.0$ . Глубины гипоцентров варьировались в диапазоне 2–37 км; при этом более 90% событий произошло на глубинах до 20 км. Следует отметить, что станция ULN находится в оптимальном диапазоне расстояний от БРЗ. Данные двух других региональных станций сети GSN [Butler et al., 2004] менее информативны, поскольку они находятся на больших расстояниях от БРЗ (станция Маканчи (MKAR) в диапазоне ~1300–2800 км, а станция Хайлар (HIA) ~700–1400 км).

При анализе записей были рассмотрены отношения амплитуд волн Sn и Pn (параметр  $\lg(ASn/APn)$ , который для краткости обозначим как Sn/Pn). Волны Sn и Pn проникают глубже границы M, и по величине параметра Sn/Pn при прочих равных условиях можно судить о степени поглощения S-волн в нижней коре и верхах мантии в области источника [Molnar, Oliver, 1969; Копничев, Аракелян, 1988; Копничев, Соколова, 2010а, б, 2011, 2012].

Поскольку поглощение сейсмических волн существенно зависит от периода колебаний, проводилась предварительная частотная фильтрация записей (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной 2/3 октавы [Копничев, 1985]).

### АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рис. 3 показаны три пары записей землетрясений, полученных ст. ULN. Первая пара соответствует событиям, произошедшим на юго-западной окраине оз. Байкал и к юго-западу от него, в области хр. Хамар-Дабан. Видно, что для события в области хребта наблюдается очень высокий уровень группы Sn относительно Pn. Для другого события отношение амплитуд волн Sn и Pn значительно ниже, несмотря на малую разницу в эпицентральных расстояниях. Вторая пара представляет записи землетрясений, произошедших к востоку от северо-восточной окраины оз. Байкал. В данном случае эпицентральные расстояния для обоих событий также близки, однако для северо-западного эпицентра относительный уровень группы Sn значительно выше. Третья пара соответствует событиям с эпицентрами в восточной части БРЗ. Для события, произошедшего в очаговой области Муйского землетрясения 1957 г. через 42 года после него, относительный уровень группы Sn гораздо выше, чем для события к западу от этой зоны.

Таким образом, непосредственно в рифтовой зоне наблюдается большой контраст величин Sn/Pn для сравнительно близких эпицентров. При этом на всех записях доминирует короткопе-

риодная группа Lg, распространяющаяся в коровом волноводе [Копничев, 1985].

На рис. 4 показана зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния. Каждая точка представляет среднее значение, полученное для площадки с линейными размерами несколько десятков км. Это позволяет в значительной степени устранить погрешности, связанные с различием диаграмм направленности *P* и *S* волн для разных событий [Копничев, Соколова, 2010а, 2011, 2012].

Из рис. 4 следует, что в среднем величины Sn/Pn падают с расстоянием. Корреляционная зависимость Sn/Pn( $\Delta$ ) описывается выражением:

$$\text{Sn/Pn} \sim 1.02 - 3.75 \times 10^{-4} \Delta \text{ (км)}. \quad (1)$$

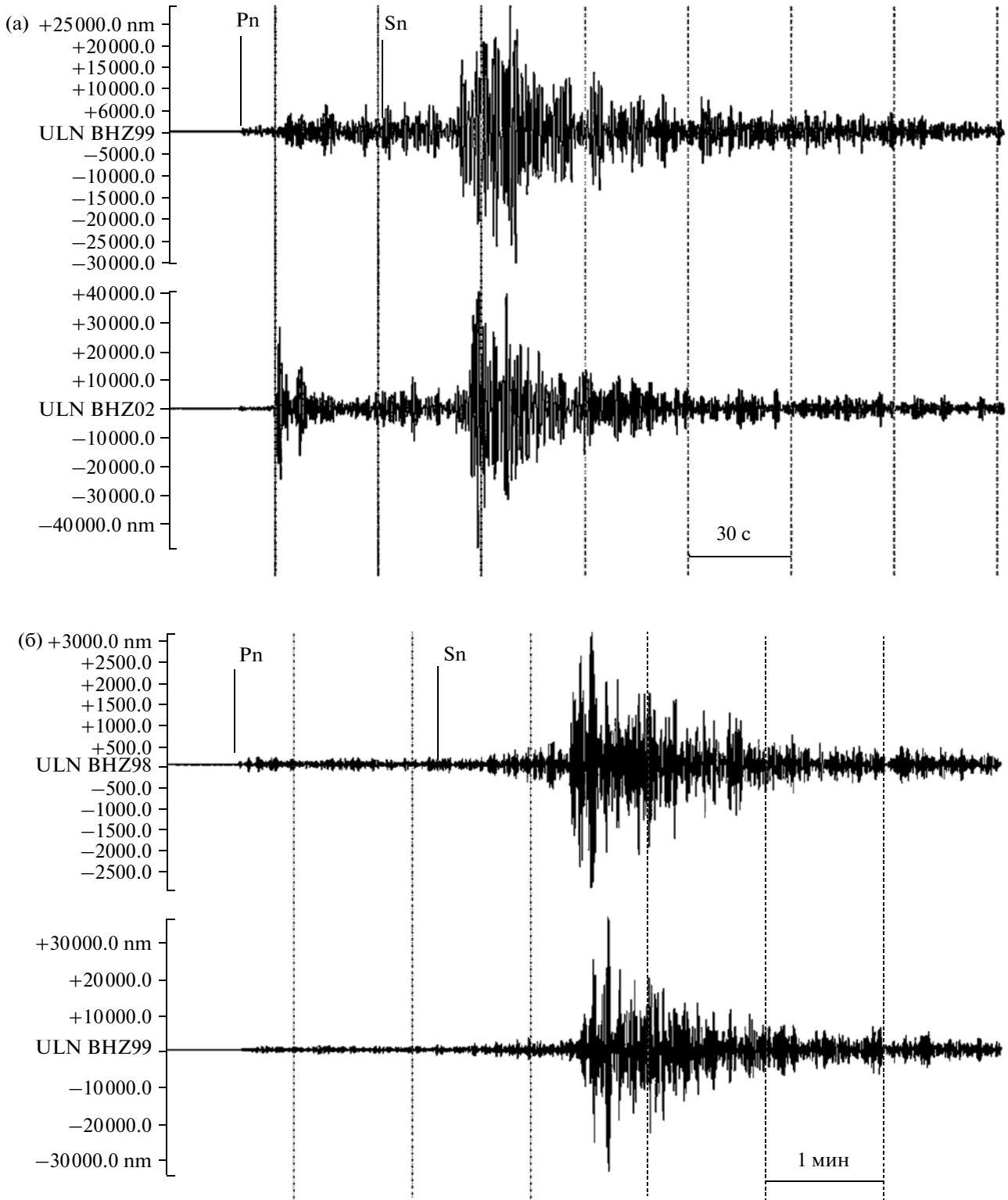
Наибольший разброс данных наблюдается на малых расстояниях, при этом самые высокие величины Sn/Pn получены для эпицентров, расположенных на южной окраине древней Сибирской платформы.

На рис. 5 приведены корреляционные зависимости типа (1) для различных районов Центральной Азии, полученные в работах [Копничев, Соколова, 2010а, 2011, 2012; Копничев и др., 2012]. Из рисунка следует, что величины Sn/Pn в районе БРЗ в целом (для данного  $\Delta$ ) значительно выше, чем для районов Центрального и Восточного Тянь-Шаня, Памира, Гиндукуша, Западных Гималаев, Кунь-Луны и Каракорума.

Были рассмотрены величины  $\Delta\text{Sn/Pn}$ , представляющие отклонения от средней зависимости (1). Все значения этих отклонений были разбиты на три уровня, соответствующие пониженному ( $\Delta\text{Sn/Pn} > 0.15$ ), промежуточному ( $-0.15 \leq \Delta\text{Sn/Pn} \leq 0.15$ ) и повышенному ( $\Delta\text{Sn/Pn} < -0.15$ ) поглощению.

На рис. 6 представлена схема поля поглощения S-волн в районе БРЗ, построенная по данным ст. ULN. На схеме, помимо средних значений  $\Delta\text{Sn/Pn}$ , нанесены также несколько точек, соответствующих индивидуальным значениям этого параметра (в тех случаях, когда было недостаточно данных для осреднения). Из рис. 6 следует, что южной окраине Сибирской платформы соответствует пониженное поглощение, а району Забайкалья – промежуточное и пониженное. В собственно рифтовой зоне наблюдается большой контраст поля поглощения. Сильное поглощение имеет место на крайнем юго-западе оз. Байкал, западнее (в области Тункинской впадины) поглощение уменьшается. Еще одна область высокого поглощения выделяется на северо-восточной окраине озера и на малом удалении к востоку от него. Небольшие зоны низких величин  $\Delta\text{Sn/Pn}$  проявились на юге оз. Хубсугул, а также на восточной окраине БРЗ (между 115° и 118° E).

Самая большая область промежуточного поглощения приурочена к центральной и северо-восточ-



**Рис. 3.** Примеры сейсмограмм землетрясений из района БРЗ.

а – эпицентры на юго-западе БРЗ: сверху – юго-западный край оз. Байкал (10.02.1999, 51.68° N, 105.05° E,  $\Delta = 448$  км); снизу – область хр. Хамар-Дабан (01.09.2002, 51.24° N, 103.30° E,  $\Delta = 464$  км),

б – эпицентры к востоку от оз. Байкал: сверху – 10.06.2007 (55.44° N, 110.55° E,  $\Delta = 877$  км); снизу – 04.12.2006 (55.77° N, 110.08° E,  $\Delta = 905$  км).

в – эпицентры на востоке БРЗ: сверху – 23.12.1998 (56.12° N, 115.36° E,  $\Delta = 1080$  км); снизу – 25.02.1999 (56.53° N, 116.11° E,  $\Delta = 1145$  км); отмечены вступления волн Pn и Sn (станция ULN, канал 1.25 Гц).

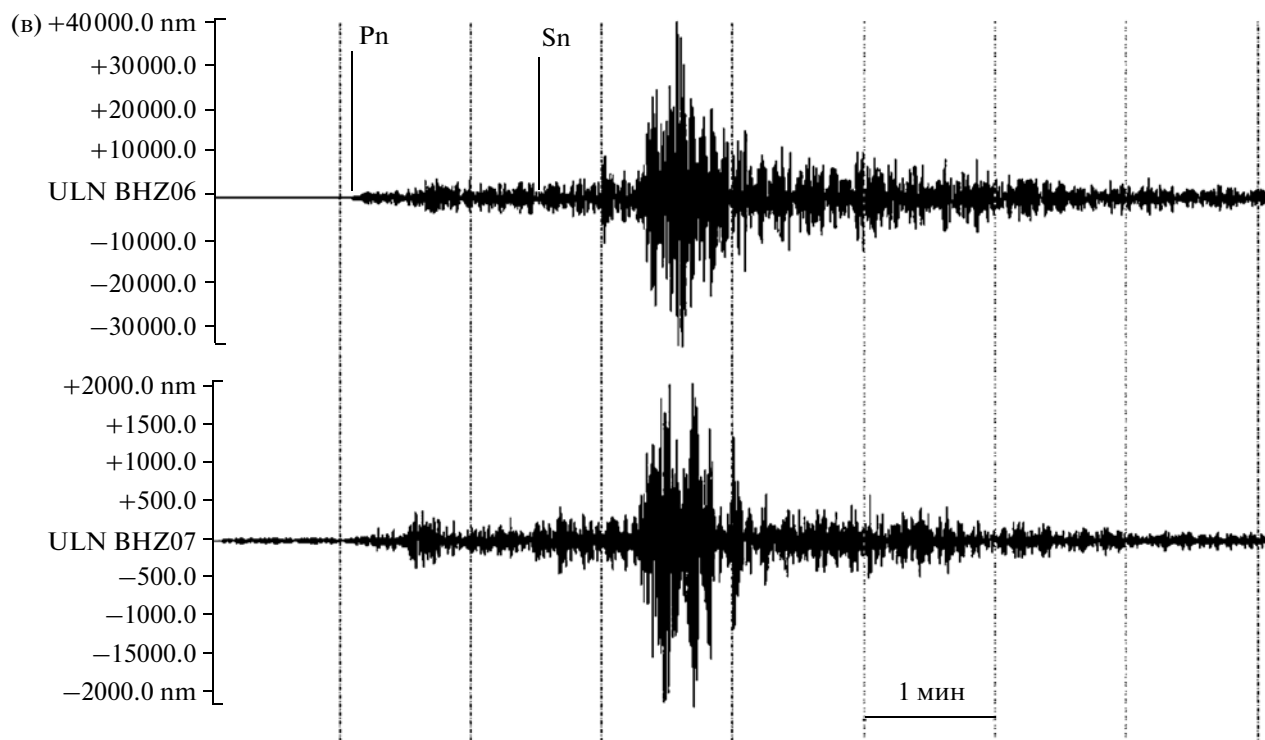


Рис. 3. Окончание.

ной частям оз. Байкал, меньшие по размеру – к северо-востоку от озера, а также на восточной окраине рифтовой зоны. Кроме того, небольшие зоны промежуточного поглощения проявились в области Тункинской впадины, на юго-западе оз. Байкал и в области Северо-Муйского хр.

Области пониженного поглощения расположены к северу от оз. Хубсугул, в центральной части оз. Байкал (около  $107^\circ$  E), на Северо-Муйском хребте и к югу от него (между  $111^\circ$  и  $114.5^\circ$  E), а также между зонами низких величин  $\Delta S_n/P_n$  на крайнем востоке БРЗ (по записи одного события).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных данных следует, что в целом поглощение короткопериодных  $S$ -волн в литосфере БРЗ и Забайкалья относительно слабое, несмотря на проявления сравнительно молодого (четвертичного) вулканизма [Рассказов, Логачев, 1993]. Об этом же свидетельствуют и очень высокие амплитуды волн  $L_g$  по сравнению с другими короткопериодными группами (см. рис. 3). Сопоставление с результатами, полученными в работах [Копничев, 2010а, 2011, 2012, Копничев и др., 2012], показывает, что средние значения параметра  $S_n/P_n$  при прочих равных условиях здесь значительно выше, чем в других районах Централь-

ной Азии. По нашему мнению, это связано со следующими обстоятельствами. В районах Западного Алтая, Центрального и Восточного Тянь-Шаня, Памира, Гиндукуша, Гималаев, Кунь-Луня и Каракорума (см. рис. 5), в отличие от БРЗ, лито-

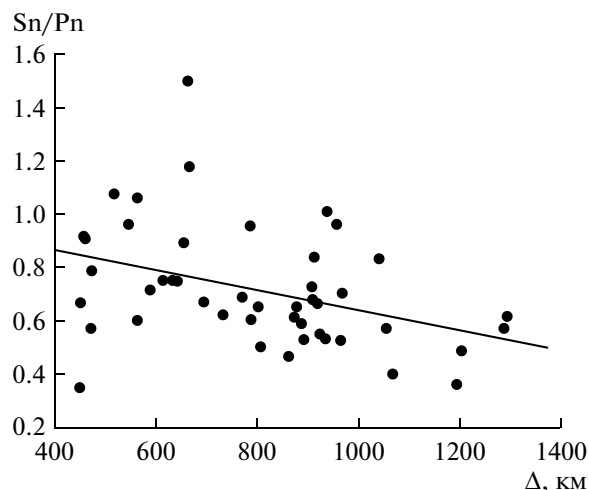


Рис. 4. Зависимость параметра  $S_n/P_n$  от эпицентрального расстояния для района БРЗ. Прямая – корреляционная зависимость (1).

сфера находится в условиях близгоризонтального сжатия, обусловленного в первую очередь индоевразийской коллизией [Tapponnier, Molnar, 1979]. Это приводит к значительно меньшей проницаемости литосферы по сравнению с рифтовой зоной, где доминируют растягивающие напряжения [Tapponnier, Molnar, 1979]. Относительно высокая проницаемость литосферы рифтовой зоны обеспечивает гораздо более быструю миграцию глубинных флюидов, что приводит к постепенному “осушению” земной коры и верхов мантии. При этом миграция флюидов может осуществляться как в вертикальном (в первую очередь), так и в горизонтальном направлениях [Каракин, Лобковский, 1982; Gold, Soter, 1984] (в последнем случае по направлению к рифтовой зоне из ее окрестностей). Это приводит к значительному уменьшению содержания флюидов в литосфере, что, в свою очередь, резко снижает поглощение поперечных волн. Известно, что всего лишь 1% объемного содержания жидкой фазы может понижать скорости S-волн на 10% и значительно увеличивать их поглощение [Hammond, Humphreys, 2000].

Перейдем теперь к сопоставлению неоднородностей поля поглощения с характеристиками сейсмичности. Из рис. 6 следует, что очаг Мондинского землетрясения 1950 г. ( $M = 7.0$ ) приурочен к области слабого поглощения S-волн, расположенной к северу от оз. Хубсугул. Относительно эпицентров землетрясений 1829 г. ( $M = 7.5$ ) и 11.04.1902 г. ( $M = 6.6$ ) ввиду низкой точности их определения можно лишь сказать, что они находятся вблизи области большого контраста поглощения на юго-западной окраине оз. Байкал. Очаги сильных землетрясений: Цаганского 1862 г. ( $M = 7.5$ ), Байкальского 1903 г. ( $M = 6.7$ ) и Средне-Байкальского 1959 г. ( $M = 6.8$ ) коррелируются с областью пониженного поглощения в центральной части оз. Байкал. Эпицентры землетрясений 17.08.1902 г. ( $M = 6.5$ ), 1917 г. ( $M = 6.6$ ) и 1937 г. ( $M = 6.5$ ) находятся в обширной области высоких величин Sn/Pn, приуроченной к Северо-Муйскому хр. И, наконец, очаг Муйского землетрясения 1957 г. ( $M = 7.6$ ) также расположен в области сравнительно слабого поглощения (хотя и выделенной по малому количеству данных).

Отсюда следует, что очаги сильных землетрясений в районе БРЗ, которые произошли с середины XIX-го до середины XX-го века, как правило, связаны с областями пониженного поглощения в литосфере. Этот вывод согласуется с полученными ранее данными, которые свидетельствуют о том, что после сильных коровых землетрясений в течение нескольких десятков лет резко

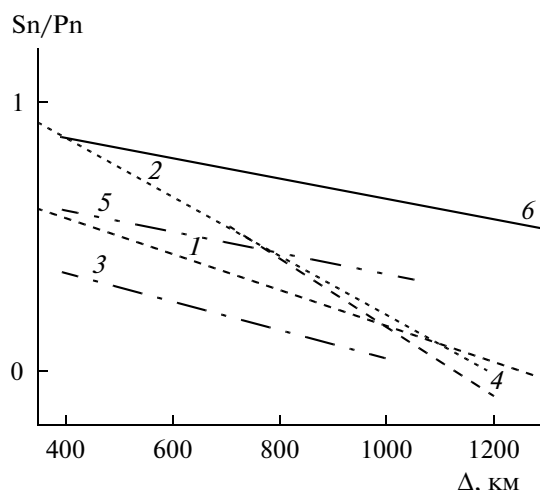


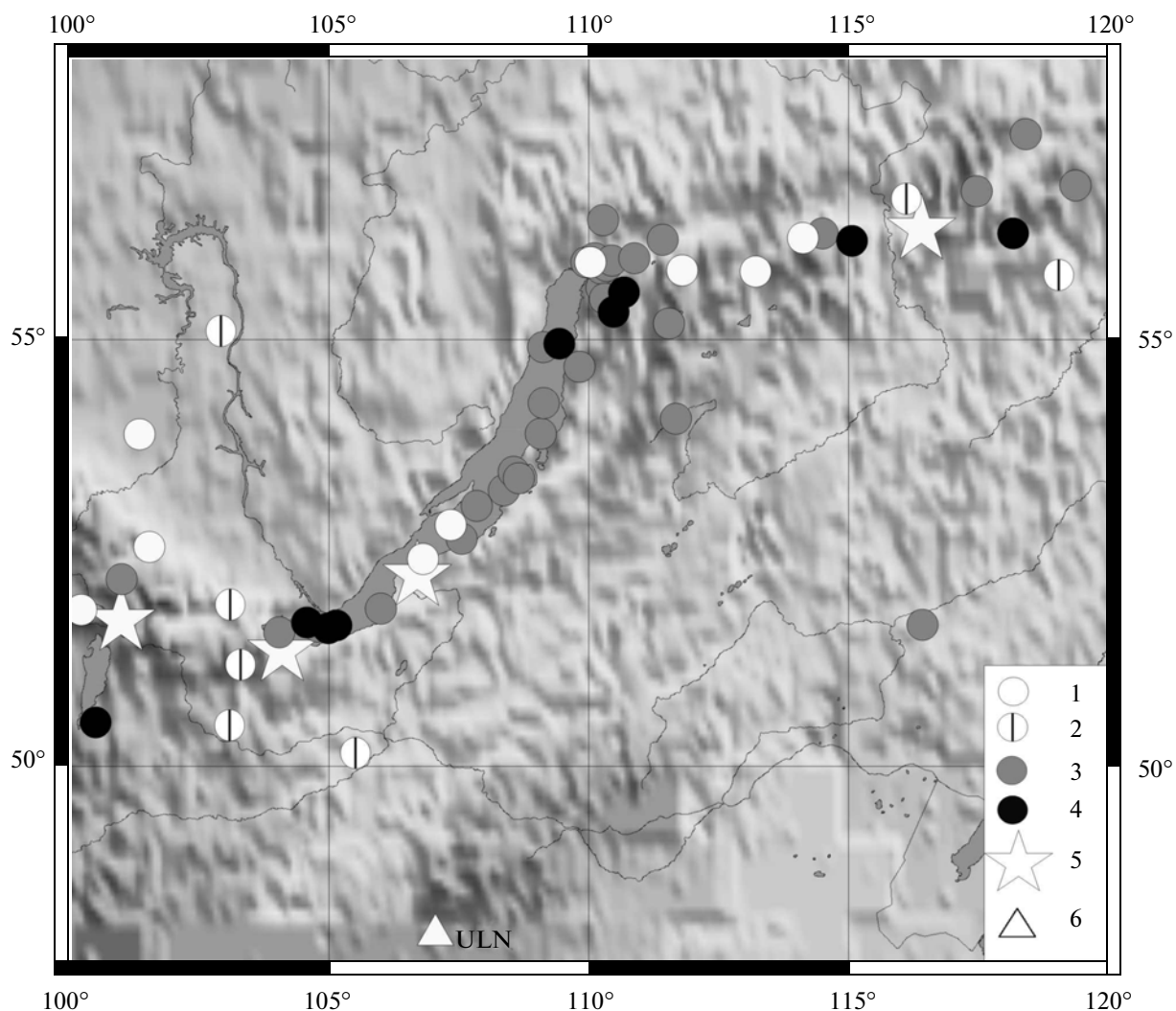
Рис. 5. Зависимости параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния для разных районов.

1 — Центральный Тянь-Шань, 2 — Восточный Тянь-Шань, 3 — Памир и Гиндукуш, 4 — Западные Гималаи, 5 — Кунь-Лунь и Каракорум, 6 — БРЗ.

ускоряется подъем глубинных флюидов в литосфере [Husen, Kissling, 2001; Копничев, Соколова, 2003; Копничев и др., 2009]. Как отмечено в [Копничев и др., 2009], одна из важных функций таких событий заключается именно в высвобождении легкой жидкой фазы, что в конечном счете приводит к уменьшению потенциальной энергии Земли.

В то же время в областях высокого поглощения S-волн, начиная по крайней мере с 1830 г., не зарегистрированы землетрясения с  $M \geq 7.0$ . Как показано в работах [Копничев, Соколова, 2010а, б, 2011, 2012], именно в таких областях велика вероятность сильных землетрясений в течение ближайших лет. При этом наибольшую опасность представляет зона аномально высокого поглощения на юго-западном фланге оз. Байкал, рядом с которой расположен крупный промышленный и научный центр, г. Иркутск. Вблизи еще одной зоны высокого поглощения на северо-востоке оз. Байкал проходит трасса БАМ, а также линия нефтепровода Восточная Сибирь—Тихий океан. В этих областях следует проводить комплекс геофизических и геохимических исследований в целях средне- и краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий.

Авторы выражают признательность IRIS DMC за предоставление цифровых данных станций GSN [Butler et al., 2004].



**Рис. 6.** Поле поглощения  $S$ -волн в районе БРЗ.

1–4 – поглощение: 1, 2 – пониженное (2 – одиночные значения  $S_n/P_n$ ), 3 – промежуточное, 4 – повышенное; 5 – эпицентры сильных землетрясений ( $M \geq 7.0$ , начиная с 1800 г.); 6 – сейсмическая станция.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Каракин А.В., Лобковский Л.И. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы // Докл. АН СССР. 1982. Т. 268. № 2. С. 324–329.

Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985. 176 с.

Копничев Ю.Ф., Аракелян А.Р. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 77–92.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения  $S$ -волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. 2003. № 7. С. 35–47.

Копничев Ю.Ф., Гордиенко Д.Д., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмических районов // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 49–64.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных  $S$ -волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью // ДАН. 2010а. Т.433. № 6. С. 808–812.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Картирование поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхах мантии Алтая // Вестник НЯЦ РК. 2010б. Вып. 1. С. 93–99.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью // ДАН. 2011. Т. 437. № 1. С. 97–101.

Копничев Ю.Ф., Кунакова О.К., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных  $S$ -волн в литосфере Центральной и Южной Азии и их связь с сейсмичностью // Вестник НЯЦ РК. 2012. Вып. 1. С. 147–152.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в

литосфере Восточного Тянь-Шаня и их связь с сейсмичностью // ДАН. 2012. Т. 442. № 6. С. 821–824.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР / Под ред. Кондорской Н.В., Шебалина Н.В. М.: Наука, 1977. 535 с.

Рассказов С.В., Логачев Н.А. Магматизм Байкальской рифтовой системы. 1993. Новосибирск: Наука, 1993. 286 с.

Butler R., Lay T., Creager K. et al. The Global seismographic network surpasses its design goal // Eos, Transactions, AGU. 2004. V. 85. № 23. P. 225, 229.

Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pure Appl. Geophys. 1984. V. 122. P. 492–530.

Hammond W., Humphreys E. Upper mantle seismic wave velocity: effects of realistic partial melt geometries // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 10975–10986.

Husen S., Kissling E. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile // Geology. 2001. V. 29. № 9. P. 847–850.

Molnar P., Oliver J. Lateral variations of attenuation in the upper mantle and discontinuities in the lithosphere // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 2648–2682.

Tapponnier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baykal regions // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 3425–3459.

## VARIATIONS IN SHORT-PERIOD SHEAR-WAVE ATTENUATION IN THE BAIKAL RIFT ZONE AND THEIR RELATIONSHIP TO SEISMICITY

Yu. F. Kopnichev<sup>a</sup> and I. N. Sokolova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
ul. B. Gruzinskaya 10, Moscow, 125395 Russia

e-mail: yufk@kndc.kz

<sup>b</sup> Institute of Geophysical Research, National Nuclear Center, Republic of Kazakhstan,  
ul. Chaikinoi 4, Alma-Ata, 050020 Republic of Kazakhstan

e-mail: sokolova@kndc.kz

Received October 25, 2012

**Abstract**—This paper presents results from a study of variations in short-period shear-wave attenuation in the lithosphere of the Baikal Rift Zone (BRZ). We used earthquake records made at the Ulan-Bator station (ULN) at epicentral distances of ~400–1300 km. The ratios of maximum amplitudes in the Sn and Pn waves were considered. We show that these ratios are on the whole considerably higher than those in other areas of Central Asia. It was found that zones of low shear wave attenuation coincide with the rupture zones of large earthquakes that occurred during the 19th and 20th centuries. We identified zones of high attenuation where no large ( $M \geq 7.0$ ) seismic events have occurred during at least 200 years. The hypothesis we propose is that precursory processes before future large earthquakes may be occurring in these zones. We discuss the question of whether wave attenuation characteristics may be related to seismicity.