

УДК 550.344

НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ АЗИИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

²⁾Копничев Ю.Ф., ¹⁾Кунакова О.К., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Проведено картирование поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере двух районов Центральной и Южной Азии (между 32 и 39° N, 72 и 82° E). Использован метод, основанный на анализе максимальных амплитуд волн Sn и Pn. Обработано более 220 записей землетрясений на расстояниях ~400 - 1200 км, полученных в 1995 - 2009 гг. станцией Ала-Арча (ААК). Установлено, что в горных районах поглощение S-волн гораздо сильнее, чем в слабосейсмичных районах Индийской платформы и Тарима. Показано, что очаговые области трех сильных землетрясений ($M_w=6.9 - 7.6$), произошедших в 1996 - 2008 гг., характеризуются относительно повышенным поглощением. Наблюдается корреляция характеристик поля поглощения с количеством сравнительно сильных афтершоков ($m_b \geq 5.0$) этих событий. Полученные данные согласуются со сделанными ранее выводами о важной роли глубинных флюидов в процессах подготовки сильных коровых землетрясений.

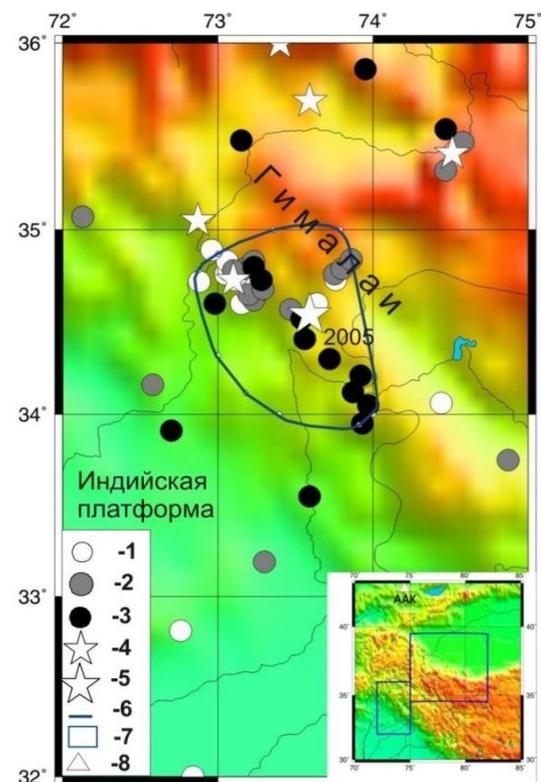
Данные о характеристиках поля поглощения короткопериодных поперечных волн позволяют получить важную информацию об особенностях строения литосферы сейсмически активных районов [1 - 4]. Это связано, в первую очередь, с очень высокой чувствительностью S-волн к присутствию жидкой фазы – флюидов или частично расплавленного материала. В статье приведены результаты изучения неоднородностей поля поглощения в литосфере двух районов Центральной и Южной Азии, включающих очаговые зоны трех недавних сильных землетрясений с $M_w=6.9 - 7.6$, а также сопоставления их с характеристиками сейсмичности.

СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваемые районы Центральной и Южной Азии ограничены координатами 32 - 36° N, 72 - 75° E и 35 - 3° N, 75 - 82° E, соответственно (рисунок 1, врезка). Первый из двух районов далее для краткости будет называться «юго-западным», а второй – «северо-восточным».

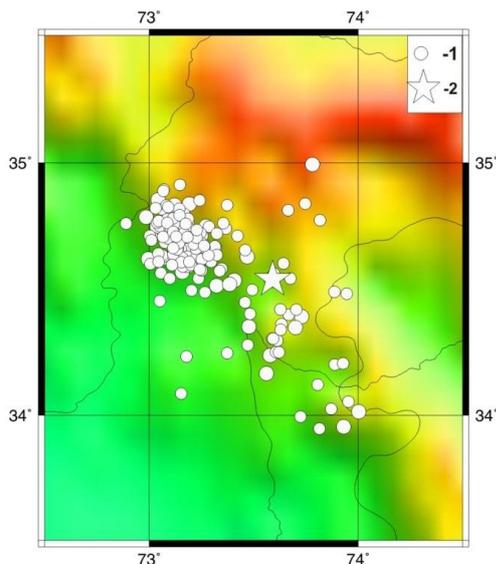
Юго-западный район включает северо-западный участок Гималаев с вершинами, достигающими 8126 м (гора Нангапарбат), и северную окраину Индийской платформы. Начиная с 1950 г. здесь произошло 6 сейсмических событий с $M \geq 6.0$, включая печально известное Кашмирское землетрясение 08.10.2005 г. ($M_w=7.6$). На рисунке 2 показана область афтершоков этого события (отобраны землетрясения с $m_b \geq 4.5$ за два месяца).

Северо-восточный район охватывает западный край Кунь-Луны и восточную часть Каракорума (с высочайшей вершиной Чогори – 8611 м), а также юго-западную окраину Таримского массива (рисунок 3). С 1950 г. в районе зарегистрировано 5 событий с $M \geq 6.0$, в том числе Каракорумское землетрясение 19.11.1996 г. ($M_w=6.9$) и землетрясение из района хр. Джанганг 20.03.2008 г. ($M_w=7.1$). Чуть севернее района исследований произошло Кашгарское землетрясение 23.08.1985 г. ($M_w=7.0$).



Поглощение: 1 – пониженное, 2 – промежуточное, 3 – повышенное. Эпицентры сильных землетрясений: 4 – $M=6.2 - 6.4$, 5 – $M_w=7.6$. 6 – область афтершоков Кашмирского землетрясения. На врезке: 7 – юго-западный и северо-восточный районы, 8 – сейсмическая станция

Рисунок 1. Юго-западный район. Поле поглощения поперечных волн и элементы сейсмичности



1 – афтершок; 2 – эпицентр главного события

Рисунок 2. Область афтершоков
Каширского землетрясения 08.10.2005 г.

В таблице даны характеристики трех землетрясений из рассматриваемых районов с $M_w \geq 6.9$, в том числе количество их афтершоков с $m_b \geq 5.0$ (N).

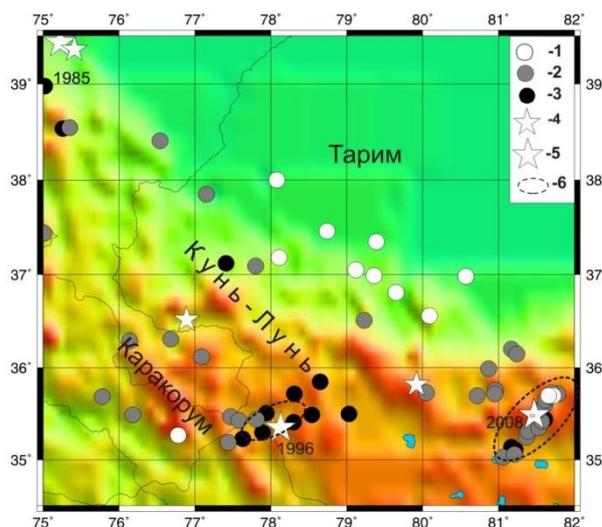
Таблица. Характеристики сильных землетрясений
из рассматриваемых районов

Дата	$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$	h, м	M_w	N	$\Delta \lg N$
19.11.1996	35.35	78.13	33	6.9	1	-0.56
08.10.2005	34.54	73.59	26	7.6	47	0.41
20.03.2008	35.49	81.47	10	7.1	14	0.39

Обращает на себя внимание резкое различие количества афтершоков для двух землетрясений с близкими величинами M_w (19.11.1996 г. и 20.03.2008 г.).

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Использован метод, основанный на анализе отношения амплитуд волн S_n и P_n (параметра $\lg(A_{S_n}/A_{P_n})$, который для краткости обозначен как S_n/P_n) [2, 3]. Совокупность экспериментальных данных позволила сделать вывод, что группа S_n сформирована поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [5]. Простые соображения показывают, что при прочих равных условиях максимальная доля энергии должна поглощаться вблизи эпицентра данного события [2]. Для районов Тянь-Шаня и Памира наиболее сильное поглощение S-волн соответствует глубинам $\sim 30 - 70$ км (нижней коре и верхам мантии) [3, 6]. Снос лучей в районах эпицентров для очагов, расположенных вблизи земной поверхности, на таких глубинах составляет $\sim 30 - 100$ км [3]. При обработке данных проведена узкополосная частотная фильтрация, позволяющая не



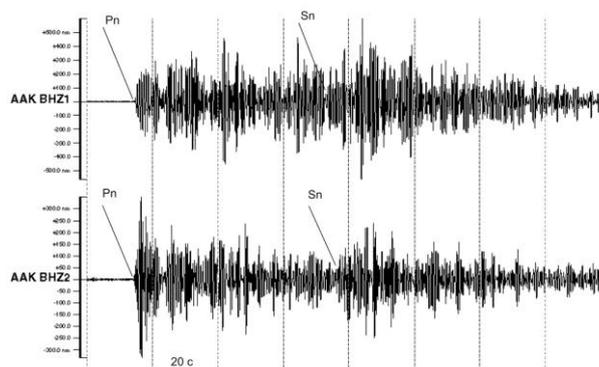
Поглощение: 1 – пониженное, 2 – промежуточное, 3 – повышенное. Эпицентры сильных землетрясений (с годом события) для $M \geq 6.9$: 4 – $M=6.1 - 6.5$, 5 – $M_w=6.9 - 7.1$. 6 – афтершоковые зоны землетрясений 1996г. и 2008 г.

Рисунок 3. Северо-восточный район. Поле поглощения поперечных волн и элементы сейсмичности

учитывать при анализе зависимость добротности от частоты колебаний. Использован фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной 2/3 октавы [7]. Были отобраны и обработаны записи коровых землетрясений с магнитудой, как правило, от 4.0 до 5.5 в диапазоне эпицентральных расстояний $\sim 400 - 1200$ км. В общей сложности обработано более 220 записей событий за 1995 - 2009 гг., полученных станцией Ала-Арча (ААК) – рисунок 1 (врезка).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Юго-западный район. На рисунке 4 приведены примеры записей землетрясений из юго-западного района, полученных примерно на одинаковых эпицентральных расстояниях.



Сейсмограммы событий: верхняя - к востоку от очаговой зоны Каширского землетрясения (23.02.1999 г., $\varphi=34.06^\circ N$, $\lambda=74.44^\circ E$, $\Delta=952$ км); нижняя – в очаговой зоне (08.06.2007 г., $\varphi=34.25^\circ N$, $\lambda=73.68^\circ E$, $\Delta=934$ км). Стрелки – время вступления волн P_n и S_n

Рисунок 4. Юго-западный район. Примеры записей землетрясений. Станция ААК, канал 1.25 Гц

Видно, что для события из очаговой зоны Кашмирского землетрясения 08.10.2005 г. амплитуда группы волн Sn относительно Pn гораздо меньше, чем для события, произошедшего к востоку от очага. Следует отметить, что для трасс, проходящих по горным районам, на сейсмограммах отсутствует коровая группа Lg. На рисунке 5 приведена зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния.

Каждая точка на рисунке 5 представляет среднее значение параметра Sn/Pn для участка с линейными размерами, как правило, несколько десятков км. Несмотря на выполненное осреднение, наблюдается достаточно большой разброс данных (от 0.71 до -0.12). Уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{Sn/Pn} &\sim 1.46 - 0.0013 (\text{км}), & (1) \\ r &= (-0.50), \end{aligned}$$

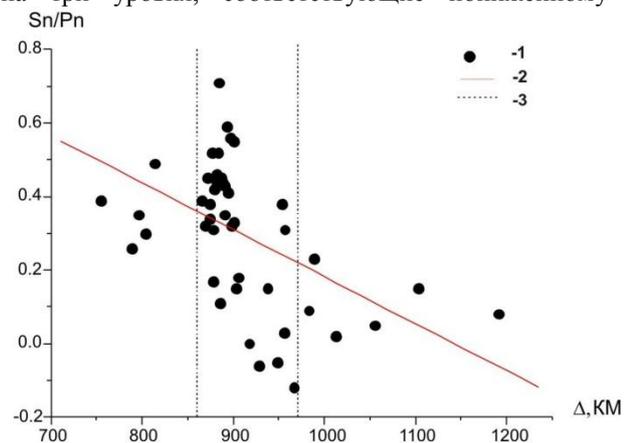
где r – коэффициент корреляции.

Рисунок 6 иллюстрирует зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния непосредственно в очаговой зоне Кашмирского землетрясения. Как следует из этого рисунка, уравнение линейной регрессии описывается формулой:

$$\begin{aligned} \text{Sn/Pn} &\sim 4.68 - 0.0049 \Delta (\text{км}), & (2) \\ r &= (-0.56). \end{aligned}$$

При пересечении сейсмическими волнами очаговой зоны значение параметра Sn/Pn уменьшается на расстоянии ~90 км в среднем примерно на 0.45.

Неоднородности поля поглощения в юго-западном районе показаны на рисунке 1. На нем приведены значения параметра Sn/Pn, «исправленные» за эпицентральное расстояние (отклонения от средней зависимости (1)). Величины Sn/Pn разбиты на три уровня, соответствующие пониженному



1 – индивидуальные данные, 2 – линия регрессии, 3 – границы очаговой зоны Кашмирского землетрясения

Рисунок 5. Юго-западный район. Зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния

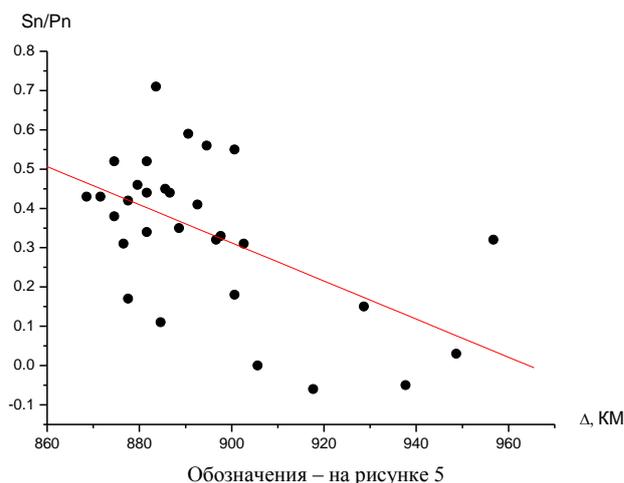
(Sn/Pn > 0.10), промежуточному ($0.10 \geq \text{Sn/Pn} \geq -0.10$) и повышенному (Sn/Pn < -0.10) поглощению S-волн. Из рисунка 1 следует, что поле поглощения в рассматриваемом районе характеризуется большой неоднородностью. В горных областях преобладает промежуточное и высокое поглощение S-волн. На северной окраине Индийского щита (по небольшому числу данных) наблюдается пониженное поглощение. Большой контраст поглощения S-волн имеет место в очаговой зоне Кашмирского землетрясения 08.10.2005 г. Из сопоставления рисунков 1 и 2 видно, что области наибольшего контраста поглощения (на северо-западе очага) соответствует максимальная плотность афтершоков.

Северо-восточный район. На рисунке 7 приведены примеры записей двух землетрясений – афтершока события 19.11.1996 г. и землетрясения к северо-востоку от очаговой зоны. Видно, что для очаговой зоны наблюдается очень низкая величина параметра Sn/Pn по сравнению с записью другого события. Интересно, что для верхней записи, соответствующей трассе через Таримский массив, наблюдается очень интенсивная группа волн Lg.

Рисунок 8 иллюстрирует зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния для северо-восточного района. В данном случае наблюдается еще больший разброс данных, чем для юго-западного района (от 1.11 до -0.28). В целом величины Sn/Pn сравнительно слабо уменьшаются с расстоянием, уравнение линейной регрессии имеет вид:

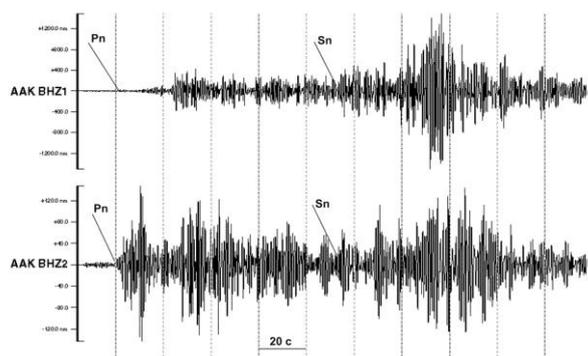
$$\text{Sn/Pn} \sim 0.76 - 0.00040 \Delta (\text{км}), \quad (3)$$

при этом коэффициент корреляции равен (-0.21), что значительно ниже, чем для юго-западного района.



Обозначения – на рисунке 5

Рисунок 6. Юго-западный район. Зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния в я очаговой зоне Кашмирского землетрясения



Сейсмограммы событий: верхняя – к северо-востоку от очаговой зоны землетрясения 19.11.1996 г. (13.11.2007 г., $\varphi=36.76^\circ \text{ N}$, $\lambda=80.05^\circ \text{ E}$, $\Delta=815 \text{ км}$); нижняя – в очаговой зоне (07.09.2004 г., $\varphi=35.72^\circ \text{ N}$, $\lambda=78.25^\circ \text{ E}$, $\Delta=833 \text{ км}$). Стрелка - время вступления волн Pn и Sn

Рисунок 7. Северо-восточный район. Примеры записей землетрясений. Станция ААК, канал 1.25 Гц

Карта поля поглощения S-волн для северо-восточного района представлена на рисунке 3. При ее построении также использованы отклонения от средней зависимости (3), при этом промежуточному поглощению соответствовал диапазон $-0.20 \leq \text{Sn/Pn} \leq 0.20$. Из рисунка 3 следует, что поглощение резко возрастает при переходе от окраины Таримского массива к горным областям. Наиболее яркая аномалия поглощения S-волн соответствует очаговой зоне землетрясения 19.11.1996 г. Здесь величины Sn/Pn (без коррекции за расстояние) уменьшаются до (-0.39) – (-0.69). Следует отметить, что площадь этой аномалии значительно больше размеров очаговой зоны – она продолжается и к северо-востоку от очага. Существенно более слабое поглощение наблюдается в очаговой зоне недавнего сильного землетрясения 20.03.2008 г. Здесь величины Sn/Pn (без коррекции за расстояние) не опускаются ниже (-0.25), несмотря на большее эпицентрального расстояние по сравнению с очагом события 19.11.1996 г. Еще одна область относительно высокого поглощения S-волн намечается на северо-западе района (к югу от очага землетрясения 23.08.1985 г. с $M_w=7.0$).

Особенности афтершоковых процессов сильных землетрясений. Проведено сопоставление афтершоковой активности для очаговых зон трех рассматриваемых сильных землетрясений (таблица). По аналогии с [8] рассмотрен простейший параметр – количество афтершоков с магнитудой $m_b \geq 5.0$ (N). Для учета различий в энергии главных событий использована как первое приближение зависимость, полученная для периферии Тихого океана [8]:

$$\lg N_{\text{то}} = M_w - 6.34 \quad (4)$$

Из таблицы, где приведены значения параметра $\Delta \lg N = \lg N - \lg N_{\text{то}}$ для трех сильных землетрясений, следует, что землетрясениям 08.10.2005 г. и 20.03.2008 г. соответствуют существенно завышенные значения

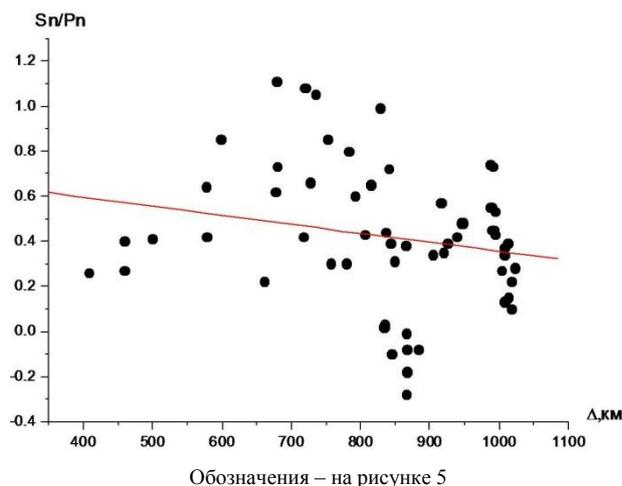


Рисунок 8. Северо-восточный район. Зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния

величины $\Delta \lg N$, а событию 19.11.1996 г. – резко заниженное значение $\Delta \lg N$. Отсюда вытекает, что для первых двух землетрясений наблюдался избыток афтершоков, а для третьего – их дефицит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные позволяют заключить, что зоны высокого поглощения S-волн в литосфере рассматриваемых районов, скорее всего, не связаны с присутствием частично расплавленных пород, поскольку здесь неизвестен молодой вулканизм [9]. Это позволяет считать, что выявленные аномальные зоны соответствуют относительно высокому содержанию глубинных флюидов. По аналогии с районами Тянь-Шаня и Памира [2, 3], в первом приближении можно принять, что наиболее сильное поглощение поперечных волн наблюдается в диапазоне глубин ~30-70 км – в нижней коре и верхах мантии.

Из рисунков 1, 3 следует, что слабосейсмичным районам – северной окраине Индийского щита и южной части Таримского массива, – соответствует пониженное поглощение S-волн в литосфере, что свидетельствует о низком содержании глубинных флюидов. Этот вывод подтверждается также очень высоким относительным уровнем амплитуд группы Lg, распространяющейся в земной коре [7], для трасс, пересекающих Таримский массив (рисунок 7). Это согласуется с полученными ранее данными [1 - 4, 10], которые говорят о том, что сильные землетрясения происходят, в первую очередь, в районах, характеризующихся присутствием заметной доли флюидов и относительно высокой проницаемостью литосферы.

Для Кашмирского землетрясения 08.10.2005 г., наиболее сильного из рассматриваемых, наблюдается резкое падение значений параметра Sn/Pn при пересечении волнами очаговой зоны (рисунки 5, 6). Однако при дальнейшем увеличении расстояния величина этого параметра снова возрастает, что свидетельствует о проникновении лучей, формирующих группу Sn, глубже литосферного слоя, насы-

щенного флюидами. Аналогичные эффекты наблюдались ранее в районах Алтая и Тянь-Шаня [2, 3]. В [2] отмечалось также, что количество афтершоков сильных землетрясений резко возрастает в районах, характеризующихся относительно невысоким содержанием флюидов. Сопоставление с характеристиками поля поглощения S-волн показывает, что уменьшению содержания флюидов в рассматриваемых здесь очаговых зонах, соответствует существенное увеличение количества афтершоков. Можно полагать, что причины обнаруженного эффекта состоят в следующем. Ранее указывалось [10], что одна из важных функций сильных коровых землетрясений состоит в высвобождении глубинных флюидов, в результате чего уменьшается, в конечном счете, потенциальная энергия Земли. При этом проницаемость пород земной коры k , от которой зависит скорость подъема флюидов, определяется, в первую очередь, объемной долей жидкой фазы ϕ (согласно модели Мак-Кензи [11], $k \sim \phi^3$). В связи с этим при низком содержании флюидов после сильного землетрясения они сравнительно медленно поднимаются в очаговую зону. Большое количество сравнительно сильных афтершоков, вызывающих локальное увеличение проницаемости, обеспечивает

ускорение процесса миграции флюидов. В то же время, возрастание числа афтершоков, скорее всего, связано с относительно большей вязкостью пород в очаговой зоне, куда в результате сильного землетрясения поступает сравнительно малая порция флюидов. Это приводит к тому, что в процессах постсейсмической деформации в очаговой зоне относительно большую роль начинает играть роль не пластическое течение, а подвижки при сравнительно сильных афтершоках (сейсмотектоническая деформация [12]). Обнаруженный эффект может служить отражением самоорганизации геодинамических процессов [13], в конечном счете ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли.

Полученные здесь и ранее [1 - 4, 10] данные свидетельствуют о том, что очаги будущих сильных землетрясений могут быть выделены по аномалиям относительно высокого поглощения S-волн в литосфере. В северо-восточном районе обнаружены две такие аномалии (к северо-востоку от очага 1996 г. и на крайнем северо-западе территории). В зонах этих аномалий целесообразно вести постоянный мониторинг геодинамических процессов с целью возможного среднесрочного прогноза сильных землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптикаева, О.И. Неоднородности литосферы и астеносферы в очаговой зоне Рачинского землетрясения / О.И. Аптикаева [и др.] // Докл. РАН, 1995. – Т. 344, № 4. – С. 533 – 538.
2. Копничев, Ю.Ф. Картирование поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхах мантии Алтая / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып.1. – С. 93 - 99.
3. Копничев, Ю.Ф. Характеристики поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, О.К. Кунакова, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып.1. – С. 111 - 115.
4. Копничев, Ю.Ф. Характеристики сейсмичности и поля поглощения S-волн в районе очага Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г. / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2008. – Т. 422, № 5. – С. 672 - 676.
5. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км / Ю.Ф. Копничев, А.Р. Аракелян // Вулканология и сейсмология, 1988. – № 4. – С. 77 – 92.
6. Бакиров, А.Б. (ред.). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Бишкек: Илим. 2006. – С. 115.
7. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. - М.: Наука, 1985. – С. 176.
8. Singh, S. Regional variations in the number of aftershocks ($m_b \geq 5.0$) of large, subduction-zone earthquakes ($M_w \geq 7.0$) / S. Singh, G. Suarez // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1988. – V. 78, N 1. – P.230 - 242.
9. Спенсер, А. (ред.). Мезозойско-кайнозойские складчатые пояса. - М.: Мир, 1977. – Т.1. – С. 452.
10. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов / Ю.Ф. Копничев, Д.Д. Гордиенко, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2009. – № 1. – С. 49 -64.
11. McKenzie, D. The generation and compaction of partially molten rocks // J. Petrol – 1984. – V.25. – P. 713 - 765.
12. Костров, Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. - М.: Наука, 1975. – С.176.
13. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем. - Новосибирск: Наука, 1992. – С. 229.

**ОРТАЛЫҚ ЖӘНЕ ОНТҮСТІК АЗИЯНЫҢ ЛИТОСФЕРАСЫНДА ҚЫСҚА
ПЕРИОДТЫ S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ БІРТЕКТІ ЕМЕСТІГІ
ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҚПЕН БАЙЛАНЫСЫ**

^{1,2)}Копничев Ю.Ф. ¹⁾Кунакова О.К., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

²⁾РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей

Орталық және Оңтүстік Азияның екі ауданы (32 және 39° N, 72 және 82° E арасында) литосферасында қысқа периодты S-толқындар жұтылу өрісін карталауы жүргізілген. Sn және Pn толқындардың максималды амплитудаларын талдауында негізделген әдісі қолданылған. 1995 - 2009 ж.ж. Ала Арша станциясымен ~400-1200 км. қашықтығында алынған жерсілкінулердің 220 астам жазбалары өңделген. Үндістан платформасы мен Тарима бәсең сейсмикалы аудандарынан таулы аудандарында S-толқындар жұтылуы едәуір артық болуы анықталған. 1996-2008 ж.ж. болған үш қатты жерсілкінулердің (Mw=6.9 - 7.6) ошақ облыстары біршама жоғары жұтылуымен сипатталатыны көрсетілген. Жұтылу өрісінің сипаттамалары сол оқиғалардың біршама қатты афтешоктардың (mb≥5.0) санымен корреляциясы байқалады. Алынған деректер, жер қыртысында қатты жерсілкінулер дайындалу процессінде терендегі флюидтердің маңызы зор туралы бұрын жасалған қорытындысына сәйкес келеді.

**HETEROGENEITIES OF S WAVE ATTENUATION FIELD IN THE LITHOSPHERE
OF CENTRAL AND SOUTH ASIA AND THEIR RELATION TO SEISMICITY**

²⁾Yu.F. Kopnichev, ¹⁾O.K. Kunakova, ¹⁾I.N. Sokolova

¹⁾Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Mapping of S-wave attenuation field in lithosphere of Central and South Asia (between 32 and 39° N, 72 and 82° E) was done. Method of maximum amplitude ratio for Sn and Pn waves was applied. More than 220 earthquake records were analyzed, which were obtained in 1995-2009 by Ala-Archa (AAK) station at distances of ~400 - 1200 km. It was found that S-wave attenuation field was higher in mountain region than in weak seismicity areas of Indian platform and Tarim. It was shown that focal area of three strong earthquakes (Mw=6.9 - 7.6), which occurred in 1996 - 2008, are peculiar with relatively increased attenuation of short-period S waves. Correlation of attenuation field features with a number of relatively strong aftershocks (mb≥5.0) of these events was observed. The obtained data agree with previous conclusions on significance of deep fluids in preparation processes of large earthquakes.