

УДК 550.344

## НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

© 2011 г. Ю. Ф. Копничев, И. Н. Соколова

Представлено академиком А.О. Глико 01.07.2010 г.

Поступило 02.07.2010 г.

Проведено картирование поля поглощения поперечных волн в литосфере Туранской плиты, Западного Тянь-Шаня, Памира и Гиндукуша. Использован метод, основанный на анализе отношения максимальных амплитуд волн  $S_n$  и  $P_n$ . Обработывались записи землетрясений, полученные на расстояниях ~400–1000 км станцией ААК. Установлено, что в районах Туранской плиты, Западного Тянь-Шаня и Памира наблюдается сравнительно слабое поглощение. Наибольшая область сильного поглощения находится в районе Афгано-Таджикской депрессии, примыкающей к Гиндукушу. Выделены области высокого поглощения, в которых не было крупных сейсмических событий ( $M \geq 7.0$ ) последние 110 лет. По аналогии с другими сейсмоактивными районами предполагается, что эти области связаны с подготовкой сильных землетрясений.

Ранее было показано, что в очаговых зонах сильных землетрясений в разных районах земного шара наблюдается высокое поглощение короткопериодных  $S$ -волн в нижней коре и верхах мантии [1–4]. Это позволяет использовать данные о неоднородности поля поглощения для выделения зон подготовки очагов сильных землетрясений. В работе [4] изучены неоднородности поля поглощения  $S$ -волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии. Здесь приведены результаты картирования поля поглощения в районах к югу и западу от Центрального Тянь-Шаня.

Рассматриваемый район, включающий Западный Тянь-Шань, восточную окраину Туранской плиты, Афгано-Таджикскую депрессию, Памир и Гиндукуш, характеризуется достаточно высокой сейсмичностью. Начиная с 1900 г. здесь (к югу от  $40^\circ \text{N}$ ) произошло 7 коровых землетрясений с  $M \geq 7.0$  (рис. 1). При этом большинство сильных со-

бытий зарегистрировано в районе Тянь-Шаня, в районах Памира и Гиндукуша произошло только по одному такому землетрясению (соответственно в 1911 и 1956 гг.). Кроме того, в районах Гиндукуша и Памира существует единственная в Центральной Азии активная зона глубокофокусной сейсмичности (землетрясения здесь происходят в диапазоне глубин 70–300 км, см. рис. 1).

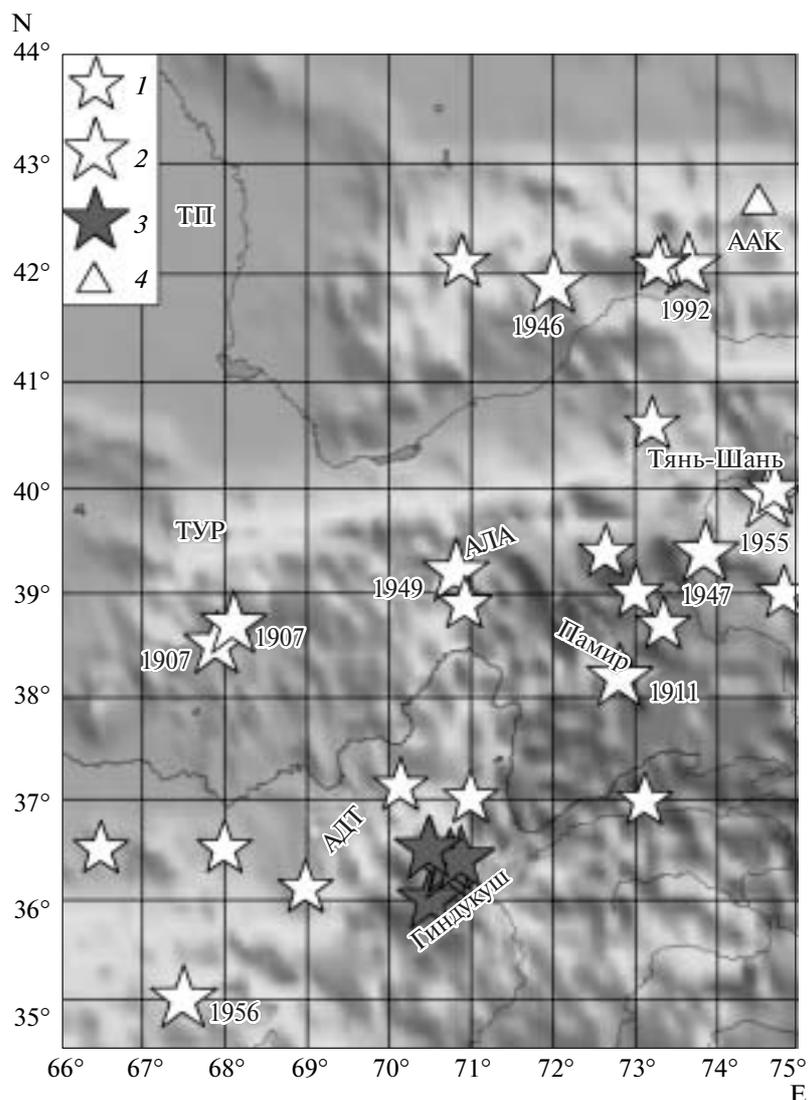
Использована методика, основанная на анализе отношений максимальных амплитуд в волнах  $S_n$  и  $P_n$  (параметра  $\lg \frac{A_{S_n}}{A_{P_n}}$ , который мы для

краткости будем обозначать как  $S_n/P_n$ ). Ранее было установлено, что группа  $S_n$  формируется поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [5]. Путем анализа записей  $S$ -коды близких землетрясений показано, что в сейсмически активных районах Центральной Азии наиболее сильное поглощение короткопериодных  $S$ -волн наблюдается, как правило, в нижней коре и верхах мантии, в слое, расположенном на глубинах ~30–70 км [6]. Оценки показывают, что для источников, расположенных на нулевой глубине, снос лучей в этом слое для группы  $S_n$  составляет ~30–100 км. В этом случае основное поглощение  $S$ -волн приходится на самые верхи мантии. Параметр  $S_n/P_n$  использовался для нормировки, так как волны  $S_n$  и  $P_n$  распространяются близкими трассами. Для учета вариаций диаграммы направленности излучения в очагах проводилось осреднение величин  $S_n/P_n$  в небольших областях с линейными размерами, как правило, несколько десятков километров. Поскольку поглощение очень сильно зависит от частоты, при анализе записей использовалась узкополосная фильтрация (фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания  $2/3$  октавы [7]).

Исследование поля поглощения в рассматриваемом районе проводилось по записям местных землетрясений, полученных цифровой станцией ААК на эпицентральных расстояниях ~400–1000 км в

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской Академии наук, Москва

Институт геофизических исследований  
Национального ядерного центра Республики Казахстан,  
г. Талгар Алмаатинской обл.



**Рис. 1.** Карта района исследований. ТП – Туранская плита, ТУР и АЛА – Туркестанский и Алайский хребты соответственно. АТД – Афгано-Таджикская депрессия. Эпицентры сильных землетрясений (с 1900 г.): 1 –  $M = 6.5-6.9$ , 2 –  $M \geq 7.0$  (указаны годы этих событий). 3 – эпицентры сильных глубокофокусных землетрясений ( $M \geq 7.0$ ). 4 – сейсмическая станция.

1994–2009 гг. Всего обработано более 400 записей землетрясений с глубинами 0–33 км из района, ограниченного координатами 35°–43° N и 66°–75° E.

На рисунке 2 показаны типичные примеры сейсмограмм землетрясений из двух районов, полученных примерно на одинаковых эпицентральных расстояниях. Видно, что для очаговой зоны двух Каратагских землетрясений 1907 г. ( $M = 7.4$  и  $7.3$ ) почти через 100 лет после этих событий амплитудный уровень группы  $S_n$  значительно выше уровня  $P_n$ . В то же время для афтершока землетрясения 30.05.1998 г. ( $M = 6.7$ ) наблюдается противоположная картина, при этом даже не удается выделить вступления волны  $S_n$  на фоне коды  $P_n$ .

На рисунке 3 приведена зависимость параметра  $S_n/P_n$  от эпицентрального расстояния  $\Delta$ . Стандартные отклонения  $\sigma$  для средних значений варьируются от 0.02 до 0.36. Несмотря на осреднение данных, наблюдается очень большой разброс величин  $S_n/P_n$  (от 0.79 до  $-0.33$ ). В целом значения  $S_n/P_n$  падают с расстоянием, как и для района Центрального Тянь-Шаня [4], уравнение линейной регрессии имеет вид

$$S_n/P_n = 0.58 - 0.00053\Delta \text{ (км)}. \quad (1)$$

На рисунке 4 приведена карта поля поглощения  $S$ -волн в литосфере рассматриваемого района. На ней показаны значения параметра  $S_n/P_n$  с учетом поправки за эпицентрального расстояния (отклонения от средней зависимости (1)). Все

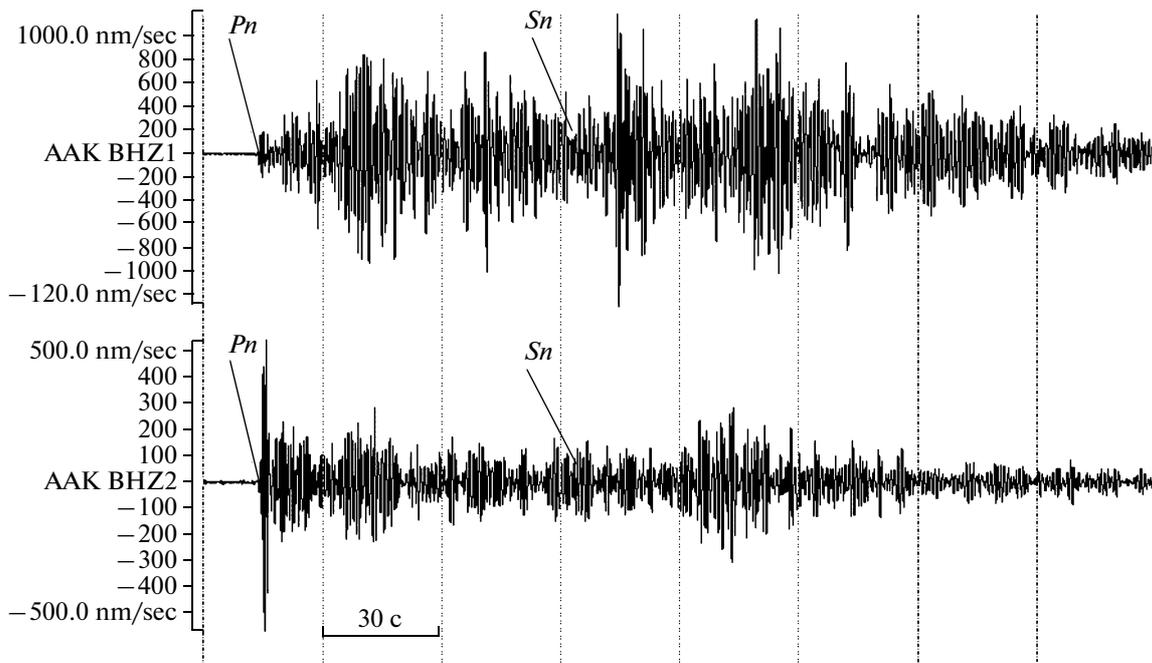


Рис. 2. Примеры сейсмограмм землетрясений. Верхняя трасса – 23.03.2001 г., 38.56° N, 68.22° E, Δ = 698 км. Нижняя трасса – 30.05.1998 г., 37.29° N, 70.04° E, Δ = 705 км. Станция ААК, канал 1.25 Гц. Стрелки соответствуют первым вступлениям волн Pn и вступлениям волн Sn по годографу.

значения параметра  $S_n/P_n$  разбиты на три уровня, соответствующие пониженому ( $S_n/P_n > 0.12$ ), промежуточному ( $-0.12 \leq S_n/P_n \leq 0.12$ ) и повышенному ( $S_n/P_n \leq -0.12$ ) поглощению. Из рис. 4 следует, что поле поглощения короткопериодных поперечных волн в исследуемом районе характеризуется большой неоднородностью. В основном пониженное и промежуточное поглощение соответствует районам Туранской плиты, Западного Тянь-Шаня и Памира. Наиболее сильное поглощение наблюдается в южной части рассматриваемой территории. Выделяется яркая аномалия низких величин  $S_n/P_n$  в районе Афгано-Таджикской депрессии, примыкающей к гиндукушской зоне глубокофокусной сейсмичности. Отметим, что эта аномалия состоит из двух относительно узких полос, вытянутых в субмеридиональных направлениях. Узкая область высокого поглощения, простирающаяся в северо-северо-восточном направлении, расположена на восточной границе гиндукушской зоны. Еще одно “пятно” сильного поглощения, ориентированное в субширотном направлении, наблюдается на границе Памира и Тянь-Шаня (к югу от Алайского хр., между 71.5° и 73° E). (Следует заметить, что эта аномалия ранее была выделена по данным станции МКАР [4], что может служить еще одним подтверждением справедливости используемой методики.)

В целом, основная часть области высокого поглощения занимает полосу шириной ~200 км, протянувшуюся в северо-восточном направлении

примерно на 600 км. Структура этой полосы достаточно сложная – внутри нее выделяются участки пониженного и промежуточного поглощения.

Намечается еще одна более узкая полоса сильного поглощения, вытянутая в северо-западном направлении (от Туркестанского хр. к Гиндукушу), которая пересекает первую.

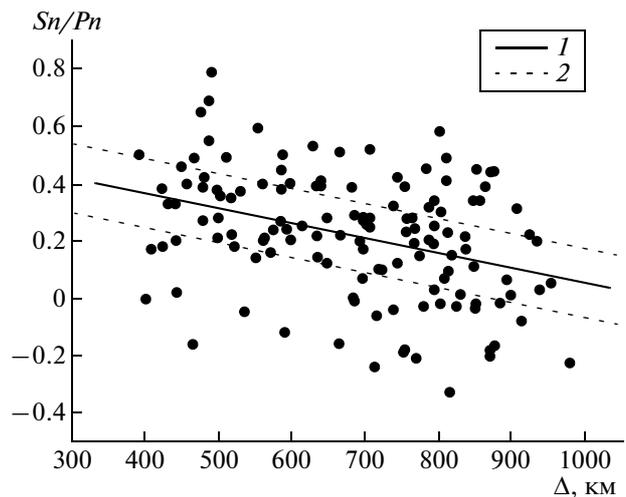
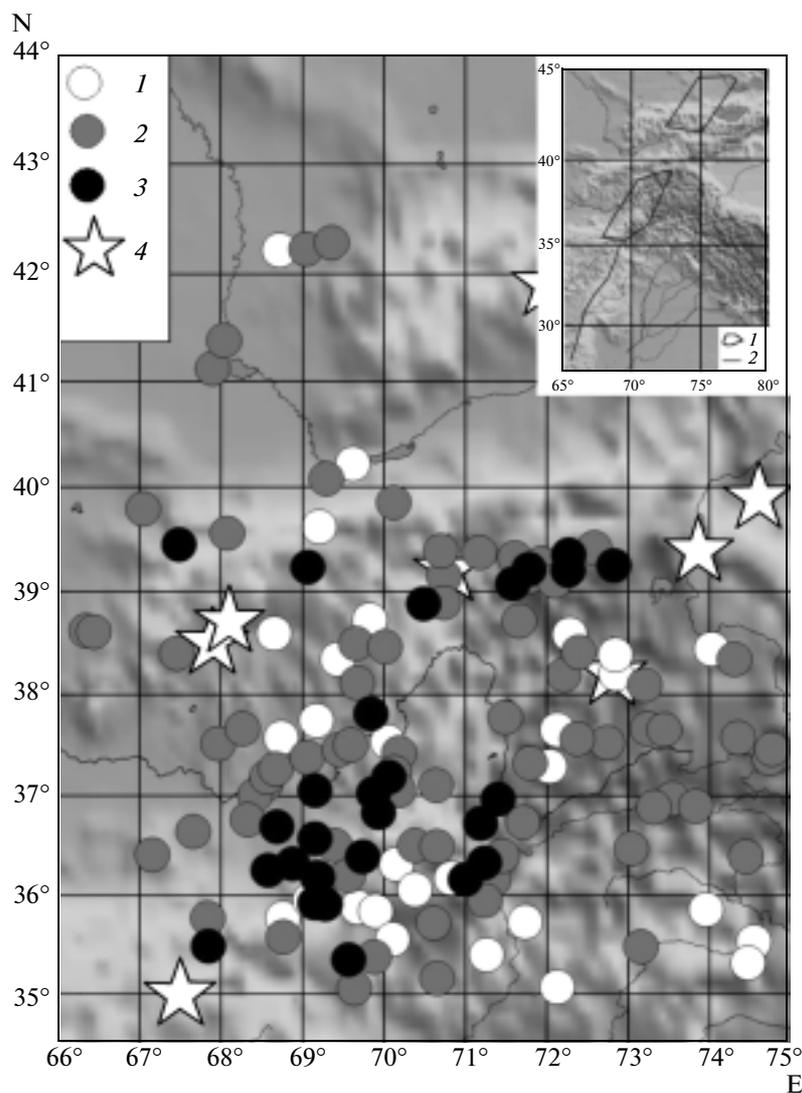


Рис. 3. Зависимость параметра  $S_n/P_n$  от расстояния. Точки – индивидуальные значения, 1 – корреляционная зависимость, 2 – границы области промежуточного поглощения.



**Рис. 4.** Неоднородности поля поглощения  $S$ -волн в рассматриваемом районе. Поглощение: 1 – пониженное, 2 – промежуточное, 3 – повышенное. 4 – эпицентры сильных коровых землетрясений ( $M \geq 7.0$ ). На врезке: 1 – полосы высокого поглощения северо-восточного простирания, 2 – Чаманский сдвиг.

Отметим, что наибольший контраст величин  $S_n/P_n$  на малых расстояниях (до 0.6–0.7) наблюдается в районах Гиндукуша и Туркестанского хр.

Сопоставление с сейсмичностью района показывает, что зонам очагов двух Каратагских, а также Сарезского (1911 г.,  $M = 7.0$ ) и Хаитского (1949 г.,  $M = 7.4$ ) землетрясений соответствует пониженное и промежуточное поглощение  $S$ -волн. Вместе с тем очаговые зоны этих событий, а также Афганского землетрясения 1956 г. ( $M = 7.2$ ) тяготеют к пробелам в указанных полосах сильного поглощения или к их продолжениям. Важно отметить, что зоны сильного поглощения приурочены к областям, где последние 110 лет не было землетрясений с  $M \geq 7.0$ . В то же время в этих зонах произошло несколько более слабых событий с  $M = 6.5$ – $6.8$  (рис. 1).

Подчеркнем, что наиболее сильное поглощение наблюдается в районах Алайского хр., Афгано-Таджикской депрессии и Гиндукуша, где отсутствуют относительно молодые магматические породы. Это позволяет считать, что низкие величины  $S_n/P_n$ , как и в районах Алтая и Центрального Тянь-Шаня [3, 4], связаны в первую очередь с присутствием заметной доли флюидов, а не частично расплавленных пород. По аналогии с Центральным Тянь-Шанем [4] можно предполагать, что наиболее сильное поглощение  $S$ -волн соответствует глубинам  $\sim 30$ – $70$  км.

Существенно, что широкая полоса сильного поглощения служит продолжением аналогичной полосы, выделенной ранее в районах Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии и простирающейся (с пробелами) от  $39^\circ$  N до  $45^\circ$  N (рис. 4) [4]. В ука-

занной работе отмечено, что полосы сильного поглощения, скорее всего, связаны с постепенным подъемом флюидов в верхах мантии и земной коре под действием сдвиговых напряжений [8, 9]. Можно полагать, что и в данном случае наблюдается аналогичный эффект, поскольку положение самых крупных зон сильного поглощения в районах Афгано-Таджикской депрессии и Гиндукуша примерно соответствует ориентации максимальных сдвиговых напряжений в литосфере этих районов [10]. В пользу такого заключения свидетельствует и тот факт, что полосы сильного поглощения северо-восточного простирания в районах Афгано-Таджикской депрессии, Гиндукуша, Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии расположены на продолжении крупнейшего Чаманского левостороннего сдвига, протянувшегося вдоль границы Индийской плиты от  $28^{\circ}$  до  $35^{\circ}$  N (рис. 4).

Полученные результаты согласуются со сделанными ранее выводами о том, что после достаточно сильных ( $M \geq 7.0$ ) коровых землетрясений наблюдается подъем флюидов из верхов мантии в земную кору [2–4, 11–14]. Это позволяет объяснить сравнительно слабое поглощение в очаговых зонах двух Каратагских, Сарезского и Хаитского землетрясений.

Особый интерес представляют зоны сильного поглощения, которые пока не связаны с очагами произошедших сильных землетрясений с  $M \geq 7.0$ , как например, в районах Алтая и Центрального Тянь-Шаня [3, 4]. В соответствии с предложенной ранее моделью формирования очага сильного корового землетрясения [15] в таких зонах может происходить подготовка крупных сейсмических событий. Это относится в первую очередь к восточной окраине Афгано-Таджикской депрессии. Отметим, что здесь уже зарегистрированы два довольно сильных землетрясения с  $M = 6.7$  (в 1982 и 1998 гг.). Скорее всего, новое сильное событие может произойти в области между очагами этих землетрясений (между  $36^{\circ}$  и  $37^{\circ}$  N). Кроме того, зоны подготовки сильных сейсмических со-

бытий, возможно, связаны с областями низких величин  $Sh/Pn$  в районах Туркестанского и к югу от Алайского хребтов, а также на восточной окраине Гиндукуша. В этих районах целесообразно вести постоянный мониторинг геодинамических процессов с целью среднесрочного прогноза землетрясений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антикаева О.И., Арефьев С.С., Кветинский С.И. и др. // ДАН. 1995. Т. 344. № 4. С. 533–538.
2. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. // Физика Земли. 2003. № 7. С. 35–47.
3. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. // Вестн. НЯЦ РК. 2010. В. 1. С.93–99.
4. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. // ДАН. 2010. Т. 433. № 6. С. 808–812.
5. Копничев Ю.Ф., Аракелян А.Р. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 77–92.
6. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / Под ред. Бакирова А.Б. Бишкек: Илим. 2006. С. 115.
7. Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985. 176 с.
8. Hier-Majumder S., Kohlstedt D. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L08305.
9. Gold T., Soter S. // Pure and Appl. Geophys. 1984/1985. V. 122. P. 492–530.
10. Abers G., Bryan C., Roecker S. // Tectonics. 1988. V. 7. № 1. P. 41–56.
11. Husen S., Kissling E. // Geology. 2001. V. 29. № 9. P. 847–850.
12. Ogawa R., Heki K. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L06313.
13. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. // Вестник НЯЦ РК. 2005. В. 2. С. 147–155.
14. Копничев Ю.Ф., Гордиенко Д.Д., Соколова И.Н. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 49–64.
15. Копничев Ю.Ф., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н. // Вестник НЯЦ РК. 2004. В. 3. С. 111–118.