

УДК 550.344

НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ ВОСТОЧНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

²⁾Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

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

Приведены результаты картирования поля поглощения S-волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня с использованием метода, основанного на анализе отношения амплитуд волн Sn и Pn. Обработаны записи землетрясений на расстояниях ~350 - 1200 км от станции Маканчи (МКАР). Выделены зоны высокого поглощения S-волн, которые не связаны с сильными землетрясениями ($M \geq 7.0$), произошедшими за последние 200 лет. В двух таких зонах - к западу от г. Урумчи и в районе полигона Лобнор, - сформировались кольцевые структуры сейсмичности, аналогично району Центрального Тянь-Шаня. Предполагается, что эти зоны связаны с подготовкой сильных землетрясений.

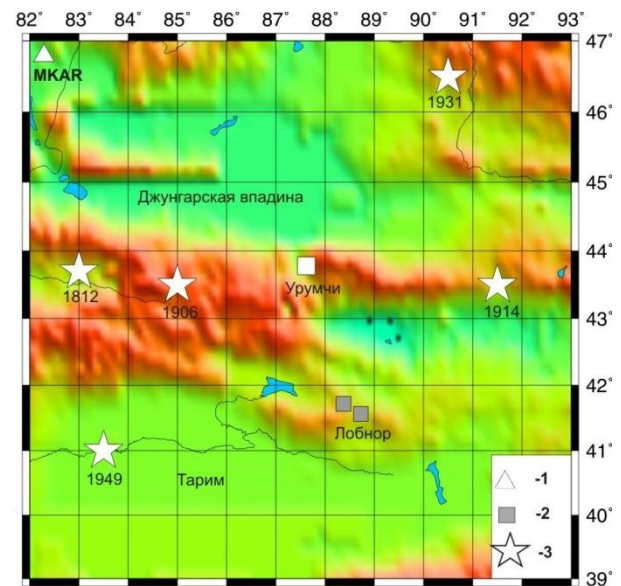
Ранее было показано [1 - 4], что с очаговыми зонами сильных землетрясений в разных районах земного шара связаны аномалии высокого поглощения короткопериодных поперечных волн в нижней коре и верхах мантии. Это позволило использовать картирование поля поглощения для обнаружения очаговых зон готовящихся сильных землетрясений. Для повышения надежности выделения таких зон целесообразно проведение анализа сейсмичности - установлено, что в областях подготовки сильных событий обычно формируются кольцевые структуры, образованные эпицентрами более слабых землетрясений [5, 6]. В статье приводятся результаты изучения с этой целью характеристик поля поглощения поперечных волн и сейсмичности в районе Восточного Тянь-Шаня. Здесь расположены крупный город Урумчи - столица СУАР КНР с населением около 2.5 млн. чел., а также испытательный ядерный полигон Лобнор. Изучение характеристик поля поглощения сейсмических волн необходимо для распознавания подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и землетрясений [7], а также для анализа геодинамических процессов в районе полигона [8]. Сильные землетрясения в этом районе могут представлять опасность и для территории юго-восточного Казахстана.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Начиная с 1812 г. в районе Восточного Тянь-Шаня (к востоку от 82°E) произошло 4 землетрясения с $M \geq 7.0$ (таблица 1, рисунок 1).

Из таблицы 1 и рисунка 1 следует, что последнее достаточно сильное землетрясение в районе Восточного Тянь-Шаня произошло в 1949 г. Затем, в течение более 60 лет, здесь не было землетрясений с $M \geq 7.0$ и, по крайней мере, с 1964 г. - землетрясений

с $M \geq 6.0$. Однако в период с 1969 г. по 1996 г. на полигоне Лобнор (рисунок 1) было произведено 22 подземных ядерных взрыва (ПЯВ) с $m_b = 4.5 - 6.5$ [9]. При этом после 1975 г. ПЯВ производились на двух площадках: на северо-западной - более слабые в штольнях ($m_b = 4.5 - 5.0$) и на юго-восточной - наиболее мощные в скважинах (рисунок 2).



1 - сейсмическая станция, 2 - испытательный полигон Лобнор, 3 - эпицентр сильного землетрясения с $M \geq 7.0$ (согласно табл.1, дополнительно - эпицентр Монголо-Алтайского землетрясения 1931 г. с $M_w = 7.9$).

Рисунок 1. Восточный Тянь-Шань - район исследования

Таблица 1. Сильные землетрясения в районе Восточного Тянь-Шаня

Дата	° с.ш.	° в.д.	M	Дата	° с.ш.	° в.д.	M
08.03.1812	43.70	83.00	7.5	04.08.1914	43.50	91.50	7.2
22.12.1906	43.50	85.00	7.2	23.02.1949	41.00	83.50	7.3

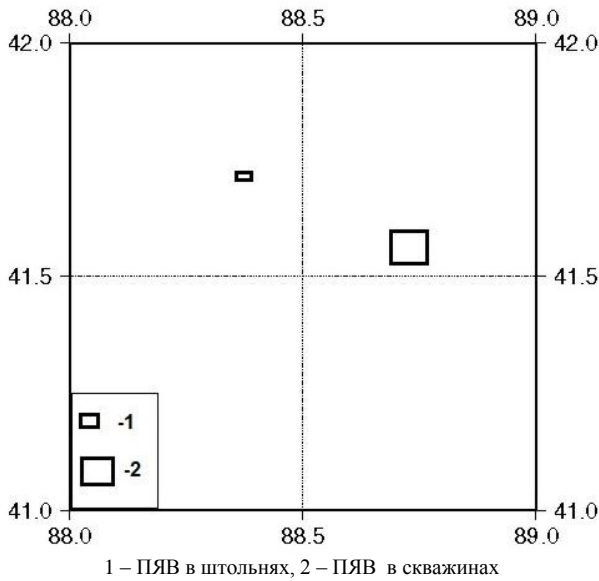


Рисунок 2. Полигон Лобнор. Схема расположения двух главных испытательных площадок

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Использована методика, основанная на анализе отношений максимальных амплитуд в волнах Sn и Pn - параметра $Ig(ASn/APn)$, который для краткости обозначен как Sn/Pn. Ранее было установлено, что группа Sn формируется поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [10]. Анализ записей S-коды близких землетрясений показал [11], что в районе Тянь-Шаня наиболее сильное поглощение короткопериодных S-волн наблюдается, как правило, в нижней коре и верхах мантии в диапазоне глубин ~ 30 – 70 км (средняя мощность коры в районе Тянь-Шаня ~50 км). Установлено, что для источников, расположенных на нулевой глубине, снос лучей в этом слое для группы волн Sn составляет ~ 30 –

100 км. В этом случае основное поглощение S-волн приходится на самые верхи мантии. Параметр Sn/Pn использован для нормировки, поскольку волны Sn и Pn распространяются по близким трассам. Поглощение существенно зависит от частоты, поэтому при анализе записей применялась узкополосная фильтрация (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [12]). Картирование поля поглощения в исследуемом районе проведено по записям местных землетрясений, зарегистрированных станцией PS23-Маканчи (МКАР) на эпицентральных расстояниях ~ 350 – 1200 км в основном в 2003-2009 гг. (рисунок 1). В общей сложности обработано около 120 записей землетрясений из района, ограниченного координатами 39° - 45° N и 82° - 93° E.

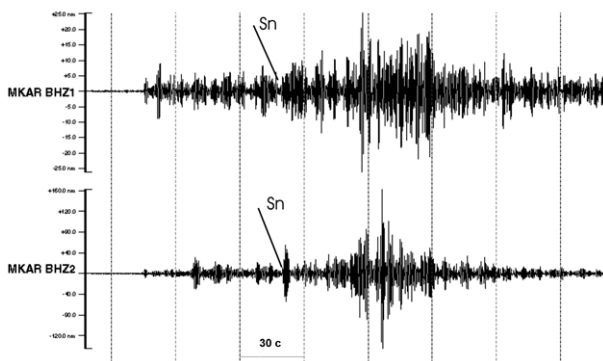
АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рисунке 3 приведены примеры сейсмограмм землетрясений из района Восточного Тянь-Шаня, полученных на близких эпицентральных расстояниях.

Видно, что для эпицентра события, расположенного к северо-западу от ядерного полигона Лобнор, амплитуды волн Pn и Sn практически одинаковы. В то же время для эпицентра землетрясения вблизи северной границы Восточного Тянь-Шаня амплитуда волн Sn гораздо больше, чем для группы Pn. Следует отметить также, что на обеих записях доминирует короткопериодная группа Lg (в отличие от сейсмограмм многих событий из района Центрального Тянь-Шаня [13]).

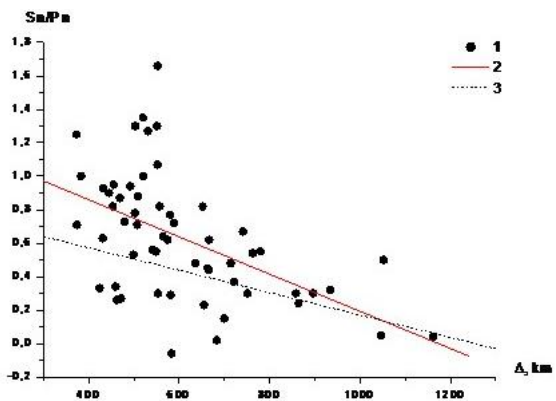
Характеристики поля поглощения поперечных волн в литосфере. На рисунке 4 приведена зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния для рассматриваемого района [13]. В диапазоне расстояний ~ 350 - 1200 км линия регрессии описывается выражением:

$$Sn/Pn \sim 1.31 - 0.0011\Delta(\text{км}) \quad (1)$$



Примеры сейсмограмм: верхняя – 42.12 N, 87.49 E, Δ = 664 км; нижняя – 43.04 N, 88.65 E, Δ = 653 км

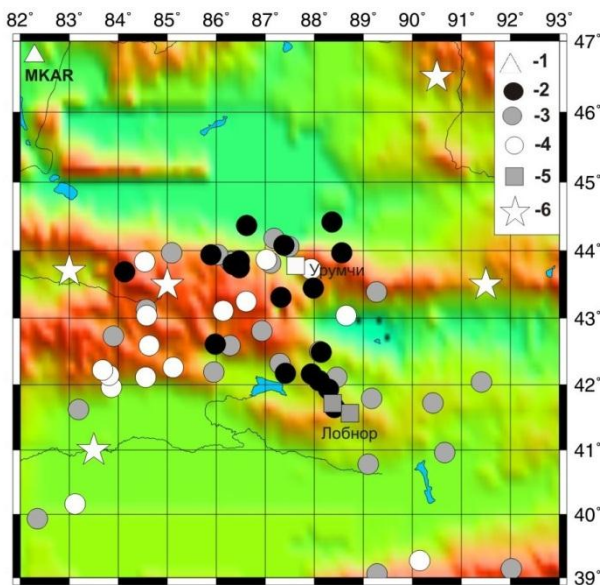
Рисунок 3. Примеры сейсмограмм землетрясений из района Восточного Тянь-Шаня. Станция МКАР, канал 1.25 Гц



1 – индивидуальные значения; 2 – корреляционная зависимость; 3 – аналогичная зависимость для Центрального Тянь-Шаня [13]

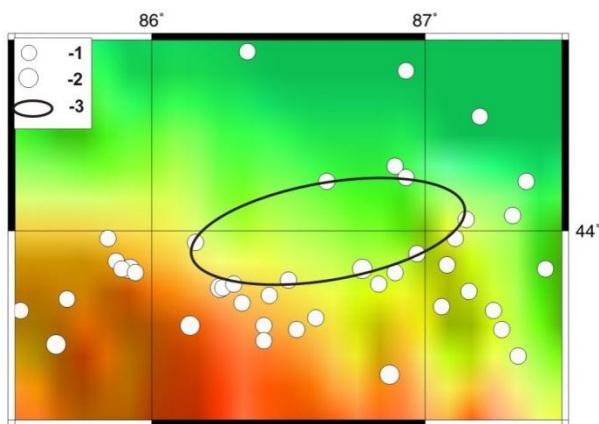
Рисунок 4. Зависимость параметра Sn/Pn от расстояния

В целом полученная линия регрессии расположена выше, но наклон ее несколько больше, чем для Центрального Тянь-Шаня. На рисунке 5 приведена карта Восточного Тянь-Шаня с данными о параметрах поглощения. Весь диапазон изменения величины Sn/Pn (отклонений от зависимости (1)) разбит на три градации, соответствующие пониженному ($Sn/Pn > 0.12$), промежуточному ($0.12 \geq Sn/Pn \geq -0.12$) и повышенному ($Sn/Pn < -0.12$) значениям поглощения.



1 – сейсмическая станция. Поглощение: 2 – повышенное; 3 – промежуточное; 4 – пониженное; 5 – площадки полигона Лобнор; 6 – эпицентр сильного землетрясения

Рисунок 5. Поле поглощения поперечных волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня



Эпицентры землетрясений: 1 – $m_b=4.0 - 4.9$; 2 – $m_b \geq 5.0$. 3 – кольцевая структура

Рисунок 6. Кольцевая структура сейсмичности на северной границе Восточного Тянь-Шаня

Из рисунка 5 следует, что район Тарима (по небольшому числу данных) характеризуется промежуточным и пониженным поглощением. Подавляющее большинство низких значений Sn/Pn сконцентрировано между 85.5° и 89° E. Районы Восточного Тянь-Шаня и южного окончания Джунгарской впадины характеризуются сильным поглощением. Яркая зона высокого поглощения находится в районе полигона Лобнор и к северо-западу от него. Еще одна зона повышенного и отчасти промежуточного поглощения расположена между 43.5° и 44.5° N (к северу от г. Урумчи). В целом зоны высокого поглощения формируют три узкие полосы – одну запад-северо-западного и две восток-северо-восточного простирания. Наибольший контраст поглощения наблюдается к западу от г. Урумчи – средние величины Sn/Pn варьируются здесь от 0.26 до 0.93. Большинство высоких значений Sn/Pn сосредоточено в полосе, простирающейся в восток-северо-восточном направлении и разделяющей две полосы сильного поглощения. Интересно, что очаг землетрясения 22.12.1906 г. ($M_w=7.2$) находится в области пересечения запад-северо-западной и продолжения одной из восток-северо-восточной полос сильного поглощения. В то же время в близких окрестностях этого очага наблюдается пониженное и промежуточное поглощение.

Кольцевые структуры сейсмичности. Рассмотрены характеристики сейсмичности в двух областях с наибольшим поглощением – на границе Джунгарской впадины и к северо-западу от полигона Лобнор. На рисунке 6 показаны эпицентры землетрясений с $m_b \geq 4.0$ для территории между 43.5° и 44.5° N, 85.5° и 87.5° E за период 01.01.1973 - 01.10.2010 гг. (с глубинами гипоцентров менее 45 км).

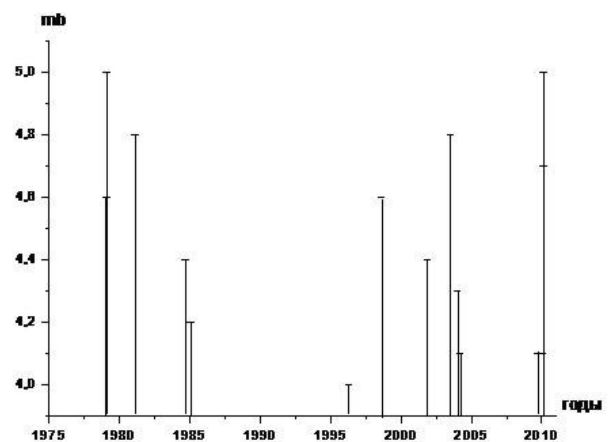
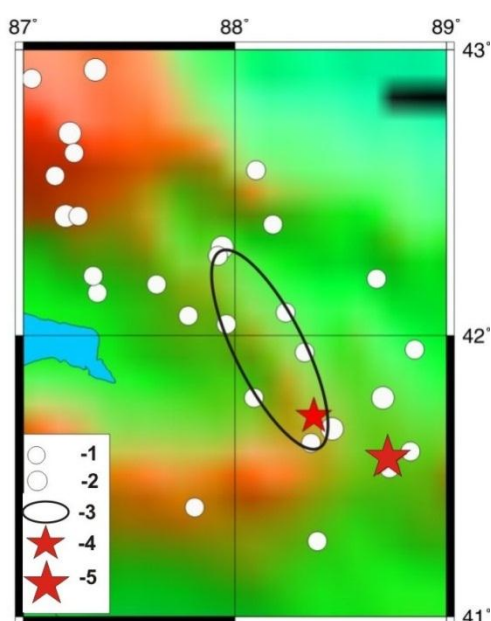


Рисунок 7. Зависимость магнитуд землетрясений в районе кольцевой структуры от времени

Можно видеть, что эпицентры формируют кольцевую структуру с размером большой оси ~ 80 км, вытянутую в субширотном направлении. На рисунке 7 показано распределение магнитуд событий в районе кольца сейсмичности во времени. Все землетрясения ($m_b=4.0-5.0$) произошли здесь начиная с 1979 г., при этом наблюдается значительное увеличение скорости сеймотектонической деформации (СТД) с 2003 г. и, особенно, в 2010 г.

Рисунок 8 иллюстрирует характеристики сейсмичности в области, ограниченной координатами $41 - 43^\circ \text{ N}$, $87 - 89^\circ \text{ E}$, в которой находится полигон Лобнор. Отобраны землетрясения с $m_b \geq 4.1$ и глубинами гипоцентров менее 40 км за тот же период времени. В центре рассматриваемой области сформировалась



Эпицентры землетрясений: 1 – $m_b=4.1 - 4.9$, 2 – $m_b \geq 5.0$.
3 – кольцевая структура. Площадки полигона Лобнор:
4 – штольни, 5 – скважины

Рисунок 8. Кольцевая структура сейсмичности к северо-западу от полигона Лобнор

ОБСУЖДЕНИЕ

Повышенное поглощение S-волн может быть обусловлено присутствием частично расплавленного материала или флюидов. Однако отсутствие молодых магматических пород в этом районе говорит о том, что области относительно высокого поглощения не связаны с плавлением пород земной коры и верхов мантии. Полученные данные свидетельствуют о том, что в целом поглощение короткопериодных S-волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня значительно слабее, чем в районе Центрального Тянь-Шаня. Это свидетельствует об уменьшении содержания флюидов в земной коре и верхах мантии к востоку от 82° E . Пониженное содержание флюидов в литосфере обуславливает большую ее вязкость, что должно приводить к меньшей скоро-

кольцевая структура с длиной большой оси ~ 90 км, вытянутая в субмеридиональном направлении.

Из рисунка 9 следует, что основная доля событий ($m_b=4.1-6.0$) произошла в 1999 - 2009 гг., при этом наблюдается снижение средней частоты СТД в последние десять лет. Следует отметить, что эпицентры шести лобнорских ПЯВ, произведенных в штольнях в 1976 - 1996 гг. ($m_b=4.5-5.0$), попадают на границу кольцевой структуры. Кроме этих событий, за изученный промежуток времени в районе кольцевой структуры произошло только два землетрясения с $m_b > 4.0$ (22.04.1983 г., $m_b=5.0$ и 02.08.1995 г., $m_b=4.1$). В то же время эпицентры наиболее сильных взрывов, проведенных в скважинах, расположены к востоку от кольца сейсмичности, на расстоянии $\sim 20 - 30$ км от его юго-восточной окраины.

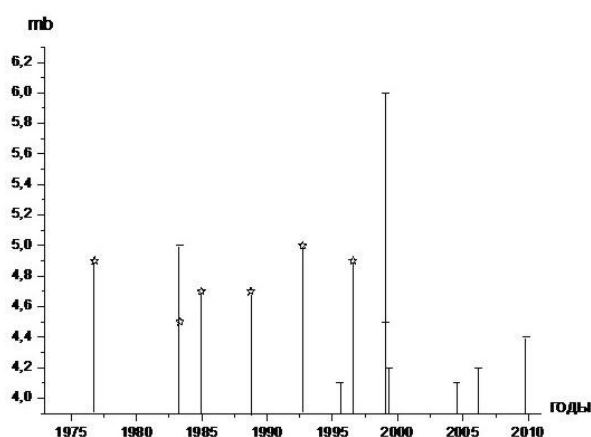


Рисунок 9. Зависимость магнитуды землетрясений и ПЯВ от времени в районе кольцевой структуры на рисунке 8

сти деформации. Этот вывод хорошо согласуется с данными GPS, которые показывают, что скорость деформации земной коры Восточного Тянь-Шаня в несколько раз ниже, чем в районе Центрального Тянь-Шаня [14].

Относительно низкое содержание флюидов позволяет объяснить и существенно более слабую сейсмичность территории Восточного Тянь-Шаня по сравнению с Центральным Тянь-Шанем, где, начиная с 1887 г., произошло 11 землетрясений с $M=7.0 - 8.3$ [15]. В последние 10 - 15 лет получено много данных, свидетельствующих о важной роли глубинных флюидов в процессах подготовки сильных коровых землетрясений [1 - 4, 6, 16]. Есть основания полагать, что для генерации сильных событий необходимо достижение определенного содержания

свободных флюидов в нижней части земной коры. Связная сеть флюидов обеспечивает концентрацию напряжений на кровле двухфазного слоя [17], облегчая инициирование подвижки в очаге готовящегося землетрясения. Пониженное среднее содержание флюидов в литосфере существенно увеличивает время, необходимое для достижения критического уровня содержания флюидов в нижней коре и, следовательно, в целом резко снижает уровень сейсмической активности. Пониженное поглощение S-волн в близких окрестностях очага землетрясения 1906 г. согласуется с полученными ранее данными, свидетельствующими о постепенном подъеме флюидов из верхов мантии в течение нескольких десятков лет после сильных сейсмических событий [1, 2, 16].

Особый интерес представляют протяженные зоны высокого поглощения, в районах которых по инструментальным и историческим данным сильные землетрясения не известны. Одна из таких зон находится на границе Джунгарской впадины, вторая – в районе полигона Лобнор и к северо-западу от него. Вывод о повышенном поглощении S-волн в верхах мантии в районе полигона согласуется с данными, полученными ранее путем анализа записей станции Каратау - ККАР [8]. Существенно, что к обеим зонам приурочены крупные кольцевые структуры сейсмичности. Полученные ранее данные [6] свидетельствуют о том, что неглубокие кольца сей-

смичности оконтуривают относительно жесткие блоки литосферы, на границах которых наблюдается концентрация напряжений и происходит подъем флюидов. Совокупность данных о неоднородностях поля поглощения и характеристиках сейсмичности может свидетельствовать о подготовке сильных землетрясений в рассматриваемых зонах. Здесь (в первую очередь, к западу от г. Урумчи) целесообразно вести постоянный мониторинг геодинамических процессов с целью среднесрочного прогноза сейсмических событий. Интересно, что в районе южного кольца сейсмичности в период 1976 - 1996 гг. было произведено шесть ПЯВ и произошло только два землетрясения. Большая часть землетрясений (включая самое сильное событие с $m_b=6.0$) зарегистрирована здесь в 1999 - 2009 гг. Отсюда может следовать, что ПЯВ, проводившиеся в 1976 - 1996 гг., инициировали подъем флюидов и начало формирования кольцевой структуры. Удаленность эпицентров наиболее мощных ПЯВ от кольца сейсмичности еще раз свидетельствует о том, что такие структуры могут формироваться только в подготовленных зонах, где присутствуют жесткие литосферные блоки [6]. Новые данные согласуются со сделанными ранее выводами об активных геодинамических процессах, связанных с подъемом мантийных флюидов, в районах крупных ядерных полигонов [8, 18].

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2003. – № 7. – С. 35 – 47.
3. 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.
4. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2007. – № 5. – С. 54 – 70.
5. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. – С. 313.
6. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями/ Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2010. – № 6. – С.34 - 51.
7. Копничев, Ю.Ф. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов на полигоне Лобнор / Ю.Ф. Копничев, О.М. Шепелев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2001. - № 12. – С. 64 - 77.
8. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе полигона Лобнор / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2008. – Т. 420, № 2. – С. 239 – 242.
9. Waldhauser F. Lop Nor revisited: underground nuclear explosion locations, 1976-1996 from double difference analysis of regional and teleseismic data/ F. Waldhauser, D. Schaff, P.Richards, W.-Y.Kim // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2004. – V. 94. N 1. – P. 1879 - 1889.
10. 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.
11. Бакиров А.Б. (ред.). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Бишкек: Илим. 2006. – С. 115.
12. Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. -М.: Наука, 1985. – С. 176.
13. 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.
14. Liu, J. Small-scale convection in the upper mantle beneath the Chinese Tian Shan mountains / J. Liu, Q. Liu, B. Guo, D.Yuen, H.Song // Phys. Earth Planet. Inter., 2007. – V. 163. – P. 179 – 190.

15. Кондорская Н.В., Шебакин Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. - М.: Наука. 1977. – С. 535.
16. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen., E.Kissling // *Geology*, 2001. – V. 29. No 9. – P. 847 – 850.
17. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // *Pageoph.*, 1984/1985. – V. 122. – P. 492 – 530.
18. Копничев Ю.Ф. Геодинамические процессы в районах трех крупных ядерных полигонов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вестник НЯЦ РК*, 2009. – Вып. 1 – С. 48 - 54.

ШЫҒЫС ТЯНЬ-ШАНЬ ЛИТОСФЕРАСЫНДА S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ БІРТЕКТІ ЕМЕСТІГІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҒЫМЕН БАЙЛАНЫСЫ

²⁾Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾ҚР ҰЯО геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

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

S_n және P_n толқындардың амплитудаларының қатынастарын талдауында негізделген әдісін пайдаланып, Шығыс Тянь-Шань литосферасында S-толқындар жұтылу өрісін карталауы жүргізілген. Мақаншы станциясынан (MKAR) ~350-1200 км. қашықтықтарындағы жерсілкінулердің жазбалары өңделген. Соңғы 200 жыл ішінде болған қатты жерсілкінулермен ($M \geq 7.0$) байланысы жоқ жоғары жұтылу зоналары бөлінген. Сондай екі зонада – Ұрымшы қ. батыс жағына қарай және Лобнор полигоны ауданында – Орталық Тянь-Шань ауданына ұқсас сейсмикалықтың сақиналы құрылымдары қалыптастырылған. Бұл зоналар қатты жерсілкінуі дайындалуымен байланысты болуы болжамда.

HETEROGENEITIES OF S-WAVE ATTENUATION FIELD IN LITHOSPHERE OF EASTERN TIEN-SHAN AND THEIR RELATION TO SEISMICITY

²⁾Yu.F. Kopnichev, 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 the Eastern Tien-Shan was carried out. S_n to P_n waves amplitude ratio method was applied. Processing of earthquake records, which were obtained by Makanchi (MKAR) seismic station (at distances ~350 – 1200km), allowed distinguishing high attenuation areas not related to strong earthquakes ($M \geq 7.0$), occurred for the past 200 years. In two areas, to the west of Urumchi city and near Lop Nor test site, ring seismicity structures have been formed similar to the Central Tien-Shan region. It is supposed that these areas are related to preparation for strong earthquakes.