

УДК 550.342.001.57

КАРТИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ПОГЛОЩЕНИЮ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

Гордиенко Д.Д.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

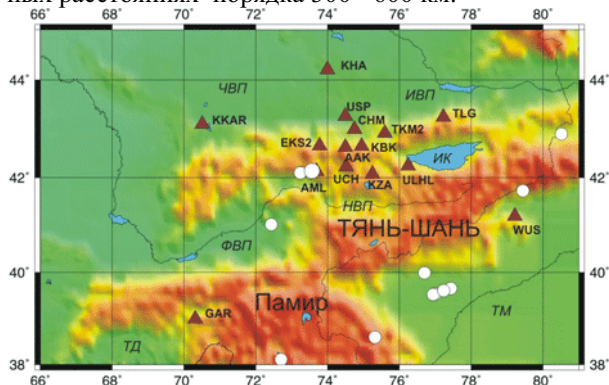
Исследованы характеристики поля поглощения короткопериодных поперечных волн в земной коре Тянь-Шаня. Обработано более 230 записей землетрясений на расстояниях ~300 – 600 км. Использован метод, основанный на анализе отношения амплитуд волн Lg и Pg. Показано, что поле поглощения в земной коре Тянь-Шаня характеризуется большой неоднородностью. Сильное поглощение соответствует очаговым областям Сусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. ($M=7,3$), а также роя сильных землетрясений в Кашгарии в 1997 - 1998 гг. Большинство трасс с пониженными значениями Lg/Pg (более 70%) пересекают небольшую зону северного Тянь-Шаня, где расположена киргизская сейсмическая группа KNET. В этой зоне выделена кольцевая структура, сформированная эпицентрами относительно глубоких землетрясений, произошедших в 1999 - 2005 гг. Полученные данные, также как данные других авторов, указывают на активные геодинамические процессы в аномальной зоне, возможно связанные с подготовкой сильного землетрясения.

ВВЕДЕНИЕ

Короткопериодные S-волны наиболее чувствительны к присутствию жидкой фазы в горных породах, поэтому по их характеристикам можно выделять области с повышенным содержанием флюидов в земной коре и верхах мантии [1-5]. В статье обсуждается картирование земной коры Тянь-Шаня и прилегающих районов – южной окраины Казахской платформы и Западного Тарима, - по поглощению поперечных сейсмических волн.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Использованы записи 15 цифровых станций, установленных в основном на выходах коренных пород (рисунок 1). Обработано более 230 записей коровых землетрясений с магнитудой менее 5.5, зарегистрированных в 1994 - 2006 гг. на эпицентральных расстояниях порядка 300 - 600 км.



Треугольник – сейсмическая станция; кружок – эпицентр землетрясения с $M \geq 6.0$ (начиная с 1991 г.); большой кружок – эпицентр Сусамырского землетрясения 19.08.1992. Впадины: ЧВП – Чуйская, ИВП – Илийская, НВП – Нарынская, ФВП – Ферганская. ТД – Афгано-Таджикская депрессия, ТМ – Таримский массив. ИК – оз. Иссык-Куль

Рисунок 1. Район исследований

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Использован метод, основанный на анализе соотношения амплитуды волн Lg и Pg [5], которые, как известно [3], представляют совокупность соответственно поперечных и продольных волн, отраженных от границ земной коры под запредельными углами. В связи с этим логарифм отношения амплитуд этих волн (параметр $\lg(ALg/APg)$, далее, для краткости, Lg/Pg) служит, при прочих равных условиях, мерой поглощения S-волн в земной коре на всей трассе от очага до наблюдательной станции. Для исследований отобраны записи землетрясений в относительно узком диапазоне эпицентральных расстояний Δ , в котором средние значения параметра Lg/Pg сравнительно мало изменяются с ростом Δ ; это позволяет в первом приближении не вводить поправку за расстояние. Анализ проведен для большого количества трасс, пересекающих рассматриваемую территорию, с тем, чтобы можно было выделить районы, характеризующиеся относительно повышенным и пониженным поглощением сейсмических волн. Преимуществом такого подхода, в частности, является возможность получить информацию о строении земной коры в районах крупных впадин, где затруднена установка чувствительных станций из-за высокого уровня микросейсмического фона. С учетом того, что поглощение сейсмических волн существенно зависит от частоты колебаний, использована узкополосная частотная фильтрация (фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной 2.3 октавы, аналогичный соответствующему ЧИСС-фильтру [3]).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рисунке 2 в качестве примера приведены сейсмограммы 8 землетрясений, произошедших в разных районах Тянь-Шаня и зарегистрированных 5 станциями, расположенными в диапазоне эпицентральных расстояний 320 - 530 км. Видно, что форма записей существенно различна для разных трасс, так что параметр Lg/Pg варьируется более чем на

порядок. Очень высокие значения параметра Lg/Pg соответствуют трассам, пересекающим Западный Тянь-Шань (станция ККАР), Исыккульскую впадину (станция ТКМ2), вдоль границы Северного Тянь-Шаня (станция СНМ) и вдоль Илийской впадины (станция КНА), а также пересекающим Центральный Тянь-Шань в субширотном направлении (станция WUS). Аномально низкие значения Lg/Pg характерны для трасс, пересекающих очаговые области Сусамырского землетрясения (станция СНМ) и роя землетрясений 1997 - 1998 гг. в Кашгарии (станция СНМ), а также для трассы на станцию ТКМ2, идущей с юго-юго-запада.

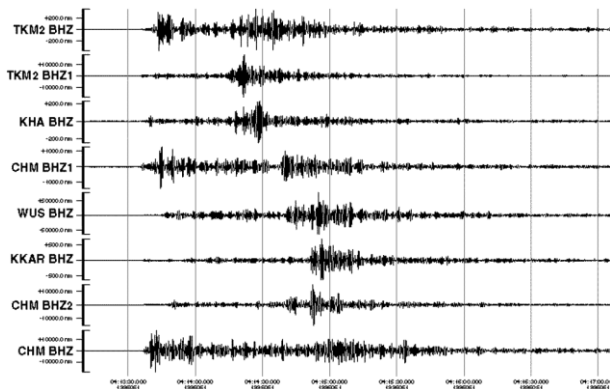
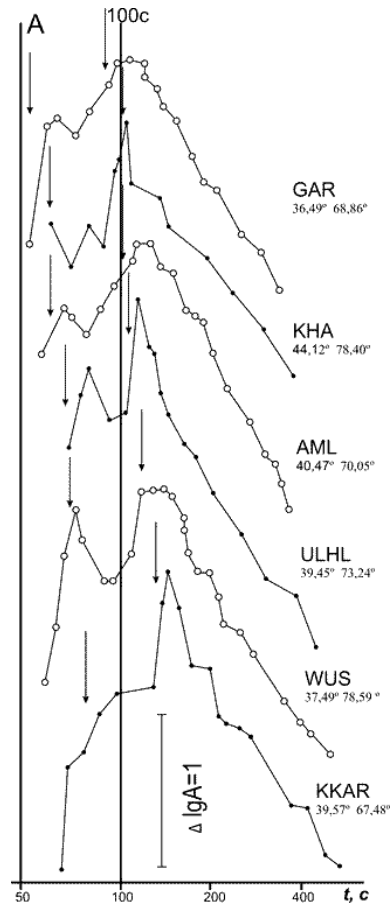


Рисунок 2. Примеры сейсмограмм землетрясений из разных районов Тянь-Шаня. ЧИСС-канал, 1.25 Гц, вертикальная компонента

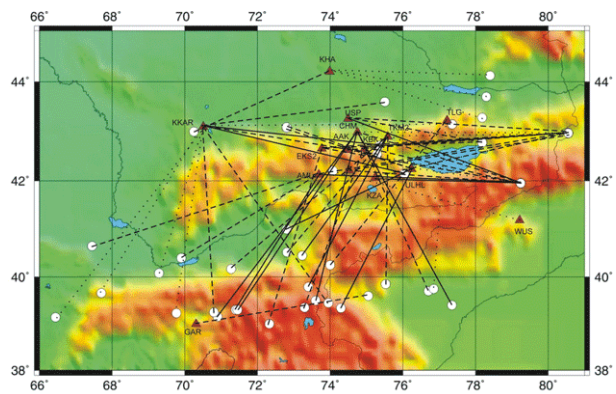
На рисунке 3 показаны огибающие записей землетрясений, полученных разными станциями. Можно видеть, что для трасс, пересекающих горные районы или впадины с осадочными породами сравнительно небольшой мощности (в данном случае Илийской, данные станции КНА), наблюдается импульсивная группа Lg с быстрым нарастанием амплитуды и резким ее спадом после достижения максимума. Группа Lg сопровождается своей кодой, переход к которой маркируется резким уменьшением наклона огибающей. В то же время для трасс, идущих через крупные впадины, заполненные мощными осадочными толщами (Ферганскую впадину, Афганско-Таджикскую депрессию и Таримский массив – данные станций АМЛ, GAR и WUS, соответственно), группа Lg имеет «размытую» форму с медленным достижением максимума и длительным участком слабо затухающих амплитуд.

На рисунке 4 приведена карта района Тянь-Шаня и его ближайших окрестностей с трассами, для которых определены значения параметра Lg/Pg .



Стрелка – момент вступления волн Lg и Pg по годографу; надпись у кривой - название станции и координаты эпицентра землетрясения

Рисунок 3. Огибающие записей землетрясений из района Тянь-Шаня



Сплошная линия – низкие, пунктир – промежуточные, точки – высокие значения Lg/Pg . Треугольник – сейсмическая станция, кружок – центр зоны, для которой усреднялись значения Lg/Pg

Рисунок 4. Тянь-Шань. Характеристика трасс по значениям Lg/Pg

Подавляющее большинство значений для характеристики трассы определено путем осреднения величин Lg/Pg , полученных по нескольким записям землетрясений (от 3 до 10) из небольшой зоны, центр которой соответствует началу трассы. Для таких трасс средние значения Lg/Pg варьируются от -0.09 до 0.99, а стандартные отклонения – от 0.02 до 0.27. Из рисунка 4 видно, что высокие значения Lg/Pg (≥ 0.60) характерны для трасс, пересекающих Западный Тянь-Шань, северную окраину Северного Тянь-Шаня (хребты Заилийский и Кунгей Алатау), Илийскую впадину, небольшие впадины Центрального Тянь-Шаня (Иссыккульскую и Нарынскую). Промежуточные значения параметра ($0.60 \geq Lg/Pg > 0.25$) соответствуют большинству трасс, пересекающих горные районы плюс небольшие впадины, а также две крупные впадины - Афгано-Таджикскую и Ферганскую (трассы через Афгано-Таджикскую впадину и Тарим с эпицентрами к югу от $38^\circ N$ на рисунке 4 не показаны в целях экономии места).

Наибольший интерес представляют трассы, для которых получены очень низкие значения Lg/Pg (≤ 0.25). К ним относятся трассы, идущие через Западный Тарим, а также трассы, пересекающие две области Тянь-Шаня, наиболее активные в сейсмическом отношении за последние 15 лет (рисунок 1): очаговые зоны Сусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. ($M=7.3$) и роя сильных землетрясений 1997-1998 гг. в Кашгарии (7 событий с $M=5.6-6.4$). Важно отметить, что большинство трасс с пониженными значениями Lg/Pg (более 70%) пересекают небольшую зону Северного Тянь-Шаня, в которой расположена киргизская сейсмическая группа KNET. Из этой группы особенно хорошо эффект снижения значения Lg/Pg проявлен на записях станции KКАR, трассы которой охватывают большой диапазон азимутов. При этом, данные для восьми из 14 таких

трасс получены в 2005 - 2006 гг., тогда как общее количество трасс с данными за 1994 - 2004 гг., составляет 40, а за 2005 г. и 4 месяца 2006 г. – 18. Таким образом, доля трасс с низкими величинами Lg/Pg в 2005 - 2006 гг. выросла почти в 3 раза.

На рисунке 5а показана карта района Северного Тянь-Шаня с трассами (по записям землетрясения 01.12.2003 в районе хр. Кетмень с $M=6.0$ и его афтершоков), для которых приведена характеристика значений отношения амплитуд Lg и Pg волн.

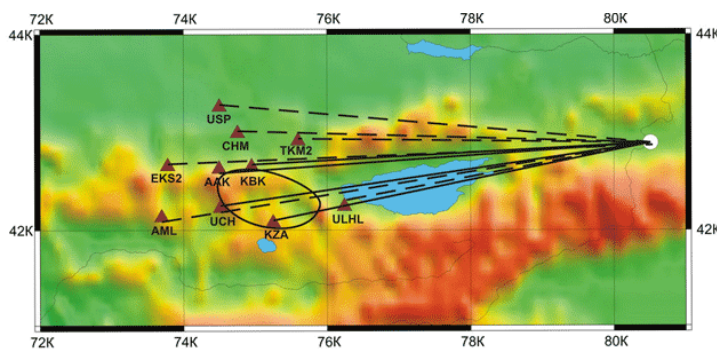
Из рисунка 5а видно, что вдоль трасс, пересекающих аномальную зону, значения параметра Lg/Pg низкие. Зависимость $Lg/Pg(\Delta)$ для трасс, пересекающих эту аномальную зону, показана на рисунке 5б. Если для района Тянь-Шаня в целом и диапазона расстояний 350 - 550 км выявить зависимость параметра Lg/Pg от Δ на фоне разброса данных не удалось [5], то для рассматриваемой области Северного Тянь-Шаня значения параметра Lg/Pg в зависимости от Δ быстро падают (в первую очередь, для трасс на станции КВК, ААК и UCH). Основываясь на этих данных, проведена оценка добротности земной коры Q на отрезке между станциями ТКМ2 и КВК в предположении, что все различия величин Lg/Pg для этих станций ($\Delta Lg/Pg = 0.55$) накапливаются на отрезке между ними ($\Delta r \sim 55$ км). Для оценки Q использована формула [3]:

$$lg(ALg/APg) \sim 0.43[-\pi\Delta r(1/csQs - 1/cpQp)]/T = -0.55, (1)$$

где: cs и cp – средние скорости S- и P-волн в земной коре (3.5 км/с и 6.0 км/с, соответственно); $T=0.8$ с.

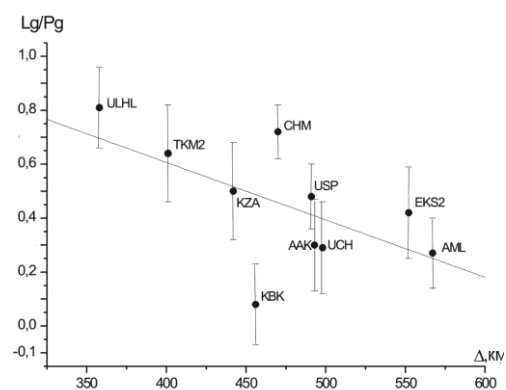
С учетом соотношения $Qp=2Qs$, полученного ранее [4], определены следующие значения $Qs \sim 35$, $Qp \sim 70$.

Аналогичная тенденция относительно значений Lg/Pg проявляется по данным, полученным для другого землетрясения - в Кашгарии 14 февраля 2005 г., $M=6.2$ (рисунок 7).



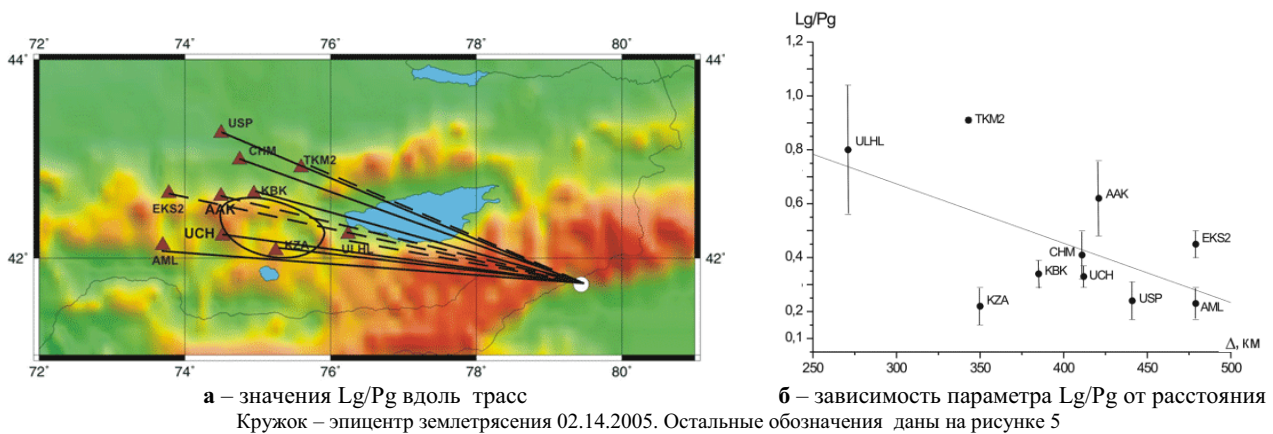
а – значения Lg/Pg вдоль трасс

Линии: сплошная – низкие, пунктир – высокие значения Lg/Pg ; треугольник – сейсмическая станция, кружок – эпицентр землетрясения 01.12.2003 (хр. Кетмень); эллипс - область эпицентров относительно глубоких событий ($h>15$ км) за 1999 - 2005 гг. Отрезок с точкой (на рисунке 5б) - среднее значение и стандартное отклонение



б – зависимость параметра Lg/Pg от расстояния

Рисунок 5. Северный Тянь-Шань. Характеристика аномальной области по записям землетрясения 01.12.2003 в районе хр. Кетмень с $M=6.0$ и его афтершоков



а – значения Lg/Pg вдоль трасс

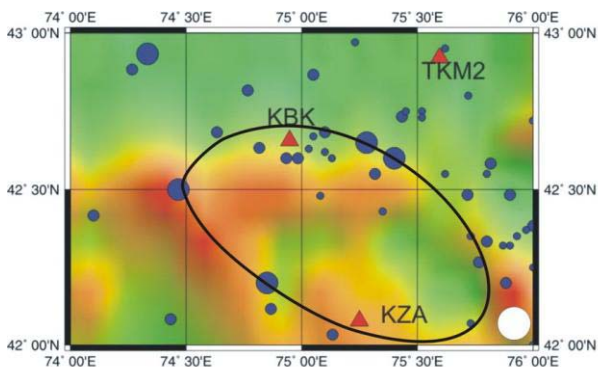
Кружок – эпицентр землетрясения 02.14.2005. Остальные обозначения даны на рисунке 5

б – зависимость параметра Lg/Pg от расстояния

Рисунок 6. Северный Тянь-Шань. Характеристика аномальной области по записям землетрясения 14.02.2005 г. в Кашгарии, $M=6.2$ и его афтершоков

Из рисунка 6 следует, что в данном случае очень низкие величины Lg/Pg наблюдаются для трасс на станции KBK, UCH, USP и, особенно, KZA.

На рисунке 7 показаны эпицентры относительно глубоких землетрясений, произошедших в исследуемой аномальной области в течение 1999 - 2006 гг. Видно, что совокупность эпицентров землетрясений имеет характерную кольцевую форму.



Треугольник – сейсмическая станция; кружок – эпицентр землетрясения; самый крупный кружок – эпицентр землетрясения 25.12.2006 ($M=5.8$)

Рисунок 7. Северный Тянь-Шань. Эпицентры глубоких землетрясений ($h > 15$ км) в аномальной области за 1999 - 2005 гг.

Согласно [11], появление относительно глубоких сейсмических событий служит важным признаком подготовки сильного землетрясения. Необходимо отметить, что 25 декабря 2006 г. на окраине исследуемой аномальной зоны произошло землетрясение с магнитудой $M=5.8$, макросейсмический эффект которого в эпицентральной зоне составил 7-8 баллов. Землетрясение вызвало большие разрушения в Кочкорском районе Киргизии, в г. Алматы оно ощущалось с интенсивностью 4-5 баллов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обращает на себя внимание «размытая» форма группы волн Lg для трасс, пересекающих крупные впадины, что объясняется образованием большого

количества обменных волн типа S-R и P-R на поверхности осадочных бассейнов [3,6]. В горных районах эти волны сравнительно быстро затухают [6], и для них характерна «нормальная» форма записей с резкой группой Lg.

В большей части рассматриваемого региона, как это следует из рисунка 4, наблюдается пониженное поглощение, что свидетельствует об относительно низком содержании свободных флюидов в земной коре. Высокие величины Lg/Pg соответствуют южной окраине Казахской платформы – Чуйской и особенно Илийской впадинам, что согласуется с повышенными скоростями P- и S-волн в земной коре этой области [7]. Интересно, что Западный Тянь-Шань в целом характеризуется значительно более слабым поглощением сейсмических волн в земной коре по сравнению с Центральным Тянь-Шанем. В то же время относительно повышенное поглощение наблюдается к югу от Тянь-Шаня – в земной коре Афгано-Таджикской депрессии и Западного Тарима, что связано, скорее всего, с большой мощностью осадочных отложений в этих районах [8].

Высокое поглощение сейсмических волн вдоль трасс, пересекающих очаговые зоны Сусамырского землетрясения, а также роя событий 1997 - 1998 гг. в Кашгарии согласуется со сделанными ранее выводами о подъеме мантийных флюидов в земную кору в таких областях до и после сильных коровых землетрясений [1, 2, 5]. В этой связи особый интерес представляет зона аномально высокого поглощения в районе Северного Тянь-Шаня (район сейсмической группы KNET), где в течение нескольких сотен лет не было сильных землетрясений с $M \geq 6.5$. Отметим, что полученная нами оценка Qs для нее даже ниже, чем для разогретой коры Тибета, где имеются проявления четвертичного и современного вулканизма [9]. Ранее [4] было показано, что эта зона характеризуется повышенным поглощением и в верхах мантии. Анализ совокупности геолого-геофизических данных привел авторов работы [10] к заклю-

чению, что здесь происходят активные геодинамические процессы, связанные с подготовкой сильного корового землетрясения. Приведенные в данной статье данные не противоречат этому заключению, а существенное увеличение доли трасс с высоким поглощением S-волн в 2005 - 2006 гг. свидетельствует о резком ускорении таких процессов в последнее

время. С этим согласуются и данные об относительно глубокой сейсмичности в указанной зоне. Все перечисленное позволяет говорить о необходимости проведения в указанном районе комплексных геофизических и геохимических исследований в целях краткосрочного прогноза сильного сейсмического события.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // Geology, 2001 - V. 29. - N 9. - P. 847 - 850.
3. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля / Ю.Ф. Копничев. - М.:Наука, 1985. - 176 с.
4. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности литосферы и очаги сильных землетрясений Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, Г. Павлис, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2002. - Т. 387. - №4. - С. 528 - 532.
5. Гордиенко, Д.Д. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхней мантии Центральной и Южной Азии / Д.Д. Гордиенко, Ю.Ф.Копничев, И.Н. Соколова И.Н. // Геодезия, картография, геоинформационные системы: Вестник высшей школы. - 2005.
6. Kopynichev, Yu.F. On the nature of an unusual wave train observed in the Northern Tien Shan region / Yu. F. Kopynichev, Sokolova I.N. // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2004. - V.94. - N 1. - P. 1 - 15.
7. Roecker, S. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien Shan / S. Roecker, T.M. Sabitova, L.P. Vinnik [et al.] // J. Geophys. Res., 1993. - V.98. - N B9. - P. 15779 - 15795.
8. Крестников, В.Н. История развития колебательных движений земной коры Памира и сопредельных частей Азии / В.Н. Крестников. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 179.
9. Fan, G. Characteristics of Lg attenuation in the Tibetan Plateau / G. Fan, T.Lay // J. Geophys. Res., 2002. - V.107. - N B1. doi: 10.1029/2001JB000804.
10. Копничев, Ю.Ф. О геодинамических процессах в районе Центрального Тянь-Шаня: выделение аномальной области по сейсмическим данным / Ю.Ф. Копничев, Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Геофизика и проблемы нераспространения Вестник НЯЦ РК, 2004. - Вып.3. - С. 119 - 123.
11. Копничев, Ю.Ф. Геодинамические процессы в очаговой зоне Байсорунского землетрясения 12 ноября 1990 г. (Северный Тянь-Шань) / Ю.Ф. Копничев, Н.Н.Михайлова // Докл. АН., 2000. - Т. 373. - № 1. - С. 93 - 97.

ҚЫСҚАПЕРИОДТЫ КӨЛДЕНЕН ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУЫ БОЙЫНША ТЯНЬ-ШАНЬ ЖЕР ҚЫРТЫСЫН КАРТАЛАУ

Гордиенко Д.Д.

ҚР ҰЯО Герфизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Тянь-Шань жер қыртысында қысқапериодты көлденен толқындар жұтылу өрісінің сипаттамалары зерттелген. Шамасы 300-600 км. қашықтығындағы 230 астам жерсілкінулердің жазбалары өңделген. Lg және Pg толқындардың амплитудалар қатынасын талдауында негізделген әдісі қолданылған. Тянь-Шань жер қыртысында жұтылу өрісі үлкен біртекті еместігімен сипатталатыны көрсетілген. Қатты жұтылуы 1992 ж. тамыздың 19-ғы Сусамыр жерсілкінуінің (M=7,3), сондай-ақ 1997-1998 ж.ж. Қашғардағы көп қатты жерсілкінулердің ошақ аумақтарына сай келеді. Lg/Pg төмен мәндеріндегі трассаларының көбі (70% астам), KNETсейсмикалық тобы орналасқан, солтүстік Тянь-Шаньнің шамалы белдемін қиып өтеді. Сондай-ақ бұл белдемінде, 1999-2005 ж.ж. болған тереңдегі жерсілкінулер эпиорталықтарымен қалыптастырылған, сақиналы құрылымы айқындалған. Алынған деректер аномаль белдемінде, қатты жерсілкінуі дайындалуымен байланысты болуына мүмкін, белсенді геодинамикалық процесстері жүріп жатқанын көрсетеді.

**MAPPING EARTH'S CRUST OF THE TIEN SHAN REGION
USING SHORT-PERIOD SHEAR WAVE ATTENUATION****D.D. Gordienko***Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper gives a short-period shear wave attenuation study in the earth's crust of the Tien Shan region. More than 230 records of earthquakes at epicentral distances of ~300-600 km have been processed. Method, based on an analysis of amplitude ratio of Lg and Pg waves, was applied. It was shown that attenuation field in the earth's crust of the region is very heterogeneous. Strong attenuation corresponds to source area of the Susamyr earthquake of August 19, 1992 ($M = 7,3$); and also that of a swarm of strong earthquakes in Kashgaria during 1997 – 1998. Most of paths with lower Lg/Pg values (more than 70%) cross a small zone of the North Tien Shan where KNET seismic array is situated. A circle structure formed by epicenters of relatively deep earthquakes occurred in 1999 – 2005 is picked out in this zone. Our data and results obtained by other authors show that active geodynamic process occurs in the abnormal zone, possibly connected with a preparation for strong earthquake.