

УДК 550.34:621.039

О ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В РАЙОНАХ ТРЕХ КРУПНЫХ ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ (ПО ДАННЫМ О ПОГЛОЩЕНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН)

^{1,2)}Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан²⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Рассмотрены пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных поперечных волн в районах трех испытательных ядерных полигонов - Семипалатинского, Невадского и Лобнор. Использованы методы анализа отношений амплитуд волн Lg и Pg, Sn и Pn, а также коды Lg. Показано, что в районе Семипалатинского полигона в целом за период ядерных испытаний поглощение волн в земной коре и верхах мантии существенно изменилось. В районе Невадского полигона наблюдается повышенное поглощение в земной коре и пониженное – в верхах мантии по сравнению с близкими окрестностями полигона. В районе полигона Лобнор выделяется аномалия сильного поглощения в верхах мантии. Предполагается, что обнаруженные эффекты связаны с активной миграцией глубинных флюидов, обусловленной длительным интенсивным техногенным воздействием на геологическую среду.

Короткопериодные поперечные сейсмические волны наиболее чувствительны к присутствию в горной породе жидкой фазы, поэтому изменение характеристик этих волн может служить основой для изучения процессов миграции флюидов в земной коре и верхах мантии [1]. В статье анализируются пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в районах трех крупных испытательных ядерных полигонов – Семипалатинского (СИП), Невадского (НИП) и Лобнор (ЛИП). Использованы записи подземных ядерных взрывов (ПЯВ), химических взрывов и землетрясений, полученные цифровыми и аналоговыми станциями, начиная с 1964 г.

МЕТОДЫ

Проанализированы отношения амплитуд волн Lg и Pg (параметр Lg/Pg), а также Sn и Pn (Sn/Pn), которые характеризуют поглощение S-волн на всей трассе от очага до регистрирующей станции (соответственно в земной коре и верхах мантии [1, 2]). Кроме того, исследованы характеристики S- и Lg-коды. Ранее [1 - 3] было показано, что на частотах около 1 Гц кода этих волн формируется в основном поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в земной коре и верхней мантии. Это позволяет изучать неоднородности поля поглощения S-волн в районах эпицентров даже по записям одной сейсмической станции. При обработке записей проведена частотная фильтрация с использованием узкополосного фильтра с центральной частотой 1.25 Гц.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Семипалатинский испытательный полигон (СИП). Для изучения пространственно-временных вариаций поля поглощения в районе данного полигона обработаны записи более чем 260 ПЯВ и землетрясений, полученных станциями Талгар (TLG), Боровое (BRVK) и Курчатов (KURK) - рисунок 1. Основной объем ядерных взрывов проведен на трех главных площадках СИП - Балапан, Дегелен и Муржик, - показанных на рисунке 2. На том же рисунке отмечены региональные

разломы, а также границы интенсивной тепловой аномалии в северо-восточном Казахстане, охватывающей СИП, которая была выявлена путем дешифрирования космических снимков [4].

На рисунке 3 представлены временные вариации исследуемого параметра Lg/Pg по записям ПЯВ, произведенных на разных площадках (станция TLG). Показаны средние величины и стандартные отклонения параметра Lg/Pg за каждый год по данным узкополосного канала с центральной частотой 1.25 Гц.

По записям ПЯВ, произведенных на площадках Дегелен и Муржик, наблюдается некоторый рост значений параметра Lg/Pg примерно до 1980 г. Это объясняется уменьшением поглощения в земной коре в районе Северного Тянь-Шаня, где расположена станция TLG [5]. Важно отметить, что после 1980 г. наблюдается постепенное уменьшение величин Lg/Pg для ПЯВ, произведенных на площадке Балапан (в отличие от площадки Дегелен).

На рисунке 4 показаны аналогичные данные, полученные по результатам анализа записей станции BRVK.

Из рисунка 4 следует, что для трасс СИП - BRVK, идущих вдоль зон крупнейших региональных разломов Северного Казахстана (рисунки 1, 2), средние величины Lg/Pg для всех площадок ниже, чем для трасс СИП - TLG. Следует отметить также меньшие значения Lg/Pg для взрывов на площадке Балапан (для которой относительно большая часть трассы проходит по СИП) по отношению к площадке Дегелен. Эта закономерность относится к периоду проведения ПЯВ с конца 1960-х до конца 1980-х, а по записям химических взрывов – и до конца 1990-х годов. Приведенные данные показывают, что в земной коре северной и восточной частей СИП в 1985 - 2000 гг. наблюдалось повышенное поглощение S-волн. На рисунке 5б показаны огибающие S-коды, построенные по записям калибровочных химических взрывов, произведенных на площадке Балапан в 1997 – 1998 гг. и зарегистрированных временными станциями [4] (рисунок 5а).

О ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В РАЙОНАХ ТРЕХ КРУПНЫХ
ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ (ПО ДАННЫМ О ПОГЛОЩЕНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН)

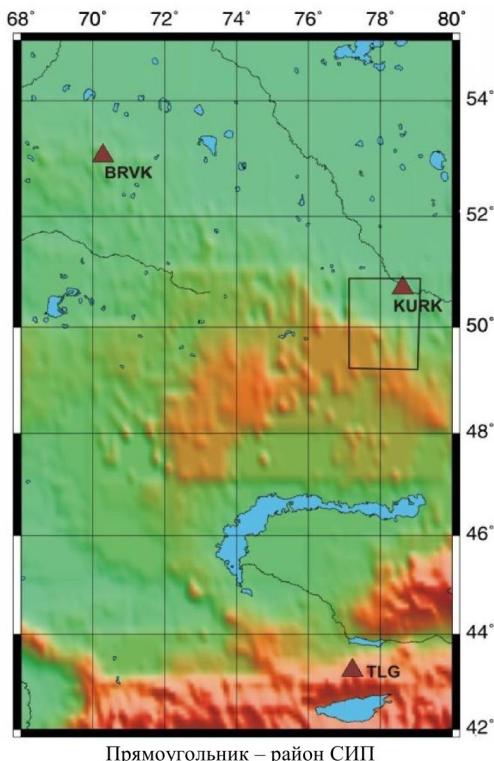
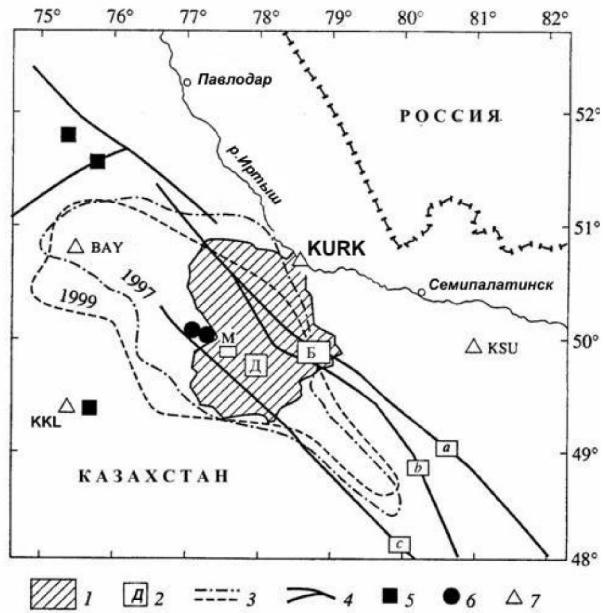
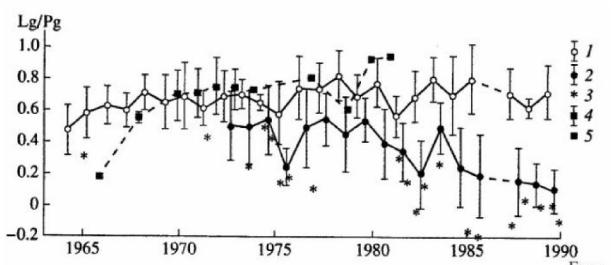


Рисунок 1. Расположение сейсмических станций, записи которых использованы в данной работе - TLG, BRVK, KURK



1 – СИП; 2 – площадки: М – Муржик, Д – Дегелен, Б – Балапан; 3 – границы тепловой аномалии в 1997 г. и 1999 г.; 4 – главные разломные зоны: а – Чинрауская, б – Калба-Чингизская, с – Главная Чингизская; 5 – наиболее крупные карьеры в окрестностях СИП; 6 – эпицентры некоторых местных землетрясений; 7 – сейсмические станции

Рисунок 2. СИП и его ближайшие окрестности

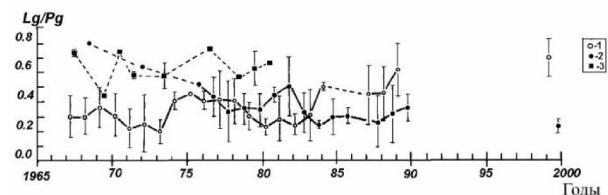


Значок (1 - 5) – средняя величина, вертикальный отрезок – стандартное отклонение за каждый год для площадок: 1 – Дегелен; 2 – Балапан; 4 - Муржик. Индивидуальная величина параметра для ПЯВ на площадках: 3 – Балапан (с эпицентрами около разломных зон); 5 - Муржик. Здесь и ниже приведены данные узкополосного канала с центральной частотой 1.25 Гц.

Рисунок 3. СИП. Вариации параметра Lg/Pg по записям ПЯВ

Видно, что в интервале времени $t=10 - 60$ с (от начала излучения в очаге) амплитуды в коде очень быстро затухают на записях станций, расположенных перед крупными разломными зонами или за ними (№ 4, 6 и 8). Этот интервал времен соответствует глубинам $\sim 20 - 120$ км. Для сравнения на рисунке 6 показан разброс данных для огибающих кодов, построенных по записям местных землетрясений и карьерных взрывов в районе Центрального Тянь-Шаня. Использованы записи 40 цифровых станций, установленных в этом районе (рисунок 6а).

Из рисунка 6б следует, что добротность, оцениваемая по коду, в интервале времен 10 - 60 с для

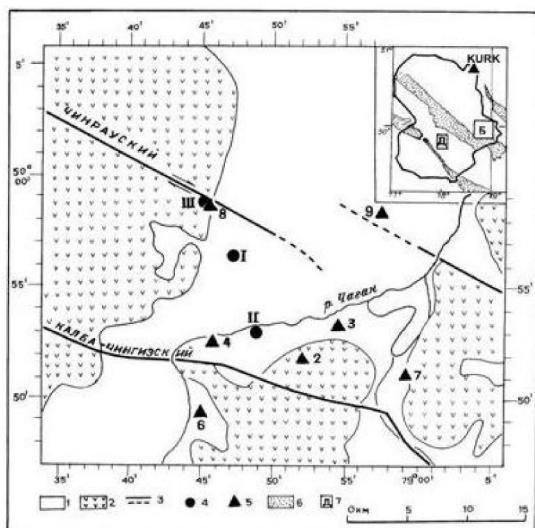


1 – Дегелен, 2 – Балапан, 3 – Муржик

Рисунок 4. СИП. Вариации параметра Lg/Pg по записям ПЯВ и химических взрывов в 1997 - 1999 гг.

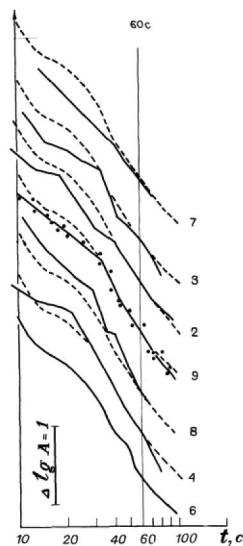
станции 6, установленной в районе площадки Балапан, ниже, чем для любой станции в районе Центрального Тянь-Шаня. На рисунке 6б показан также разброс данных в интервале $t=100 - 300$ с для огибающих, совмещенных при $t=100$ с. Видно, что S-код в районе Центрального Тянь-Шаня затухает, как правило, сильнее, чем для записей станции KURK, расположенной на расстоянии ~ 90 км к северу от эпицентров калибровочных взрывов (рисунки 1, 2). В то же время S-код в районе площадки Дегелен на глубинах до 120 км затухает гораздо слабее, чем для площадки Балапан (рисунок 7).

**О ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В РАЙОНАХ ТРЕХ КРУПНЫХ
ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ (ПО ДАННЫМ О ПОГЛОЩЕНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН)**



1 – молодые осадочные породы; 2 – выходы палеозойского фундамента; 3 – глубинные разломы. 4 – эпицентры калибровочных взрывов; 5 – сейсмические станции (на врезке – станция KUR); 6 – антиклиниории, 7 – площадки Балапан, Дегелен (на врезке)

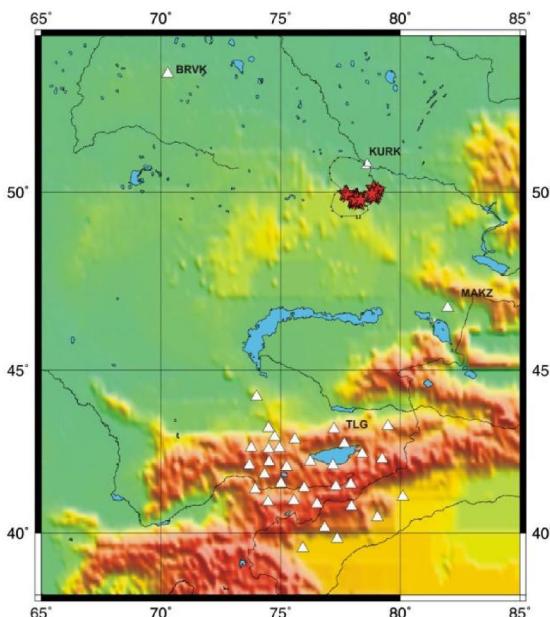
a – схема расположения станций



Номера кривых соответствуют номерам станций, показанным на рисунке 5а. Пунктир – огибающая для станции 6. Точки – разброс значений общей огибающей для станции 9

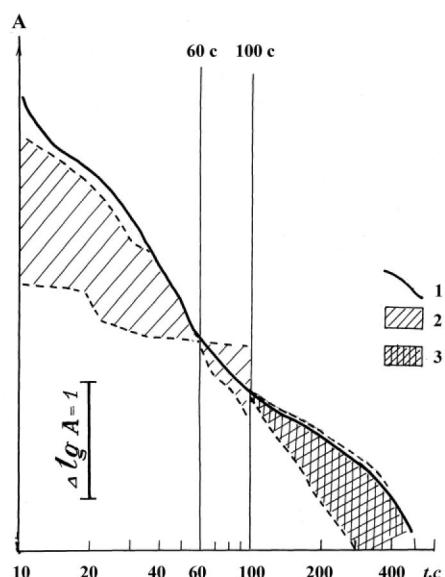
б – огибающие коды по записям калибровочных взрывов

Рисунок 5. СИП. Площадка Балапан



Значки: треугольник – станция; звездочка - ПЯВ

a – расположение сейсмических станций



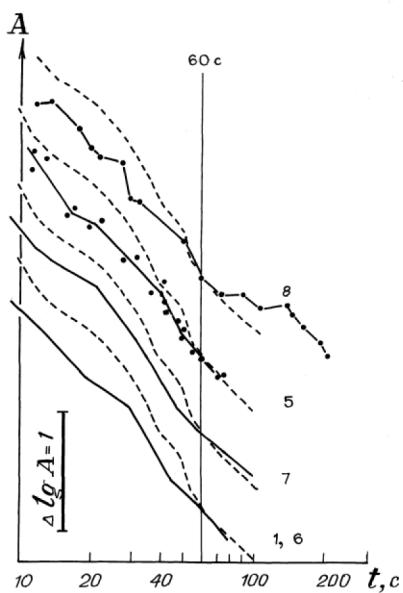
Огибающие коды: 1 – общая по данным станций 6 (Балапан) и KURK; для района Центрального Тянь-Шаня: 2 – совмещенная при t=60 с; 3 – совмещенная при t=100 с

б – диапазон разброса данных для огибающих кодов в районе Центрального Тянь-Шаня

Рисунок 6. Огибающие коды по записям местных землетрясений и взрывов в районах СИП и Центрального Тянь-Шаня

Полученные данные показывают, что, начиная со второй половины 1980-х годов, в земной коре северной и восточной частей СИП наблюдалось высокое поглощение. Кроме того, на фоне сравнительно слабого поглощения выделялась аномалия сильного поглощения поперечных сейсмических волн на глубинах до 120 км под разломными зонами в районе площадки Балапан.

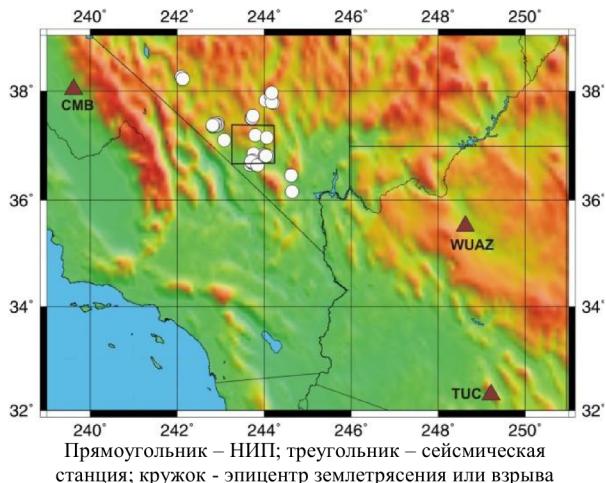
Невадский испытательный полигон (НИП). Для изучения пространственно-временных вариаций поля поглощения изучены записи ПЯВ и землетрясений в районе НИП и его близких окрестностях, полученные в 1992 - 2003 гг. станциями TUC и CMB (рисунок 8а). На рисунке 8б показана зависимость параметра $\Delta \lg A = 1$ от эпикентрального расстояния по записям землетрясений.



Условные обозначения - на рисунке 5б. Индивидуальная огибающая приведена для станции 8

Рисунок 7. СИП. Площадка Дегелен. Общие огибающие коды по записям калибровочных взрывов

Как следует из рисунка 8б, величина параметра Lg/Pg резко падает (на 0.35) на отрезке длиной ~35 км, что соответствует пересечению трассой территории НИП. При дальнейшем увеличении расстояния до $\Delta \sim (800 - 920)$ км величина Lg/Pg даже несколько возрастает. На рисунке 9 показаны огибающие коды Lg по записям землетрясений и ПЯВ для площадок в районе НИП и в районах вблизи от полигона.



Отрезок на графике: горизонтальный - среднее значение; вертикальный - стандартное отклонение

Рисунок 8. НИП. К изучению поглощения поперечных сейсмических волн

Из рисунка 9а следует, что амплитуды в ранней коде затухают гораздо слабее для событий в районе НИП. В интервале $t=250 - 400$ с эффективная добротность Qs , определяемая по формуле $Ac(t) \sim \exp(-Bt/QsT)/t$ (T – период колебаний [1]), равна 300 для событий, произошедших к югу от НИП, и 400 и 430 – для событий на двух участках полигона.

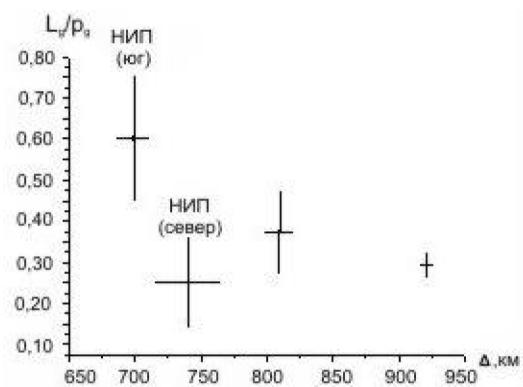
На рисунке 9б представлены огибающие коды Lg записей станции СМВ. И в этом случае амплитуда ранней коды затухают гораздо слабее для событий внутри НИП. Величины Qs в интервале $t=130-200$ с равны 200 для событий к северу и северо-западу от НИП и 280 – для района полигона.

Таким образом, в районе НИП короткопериодные поперечные волны достаточно сильно затухают в земной коре и сравнительно слабо – в верхах мантии.

Лобнорский испытательный полигон (ЛИП). При изучении пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных волн рассмотрены записи ПЯВ и землетрясений в районе Восточного Тянь-Шаня, полученные станциями MAKZ (Маканчи) и KKAR (Каратай) в 1994 - 2006 гг. (Рисунок 10 а).

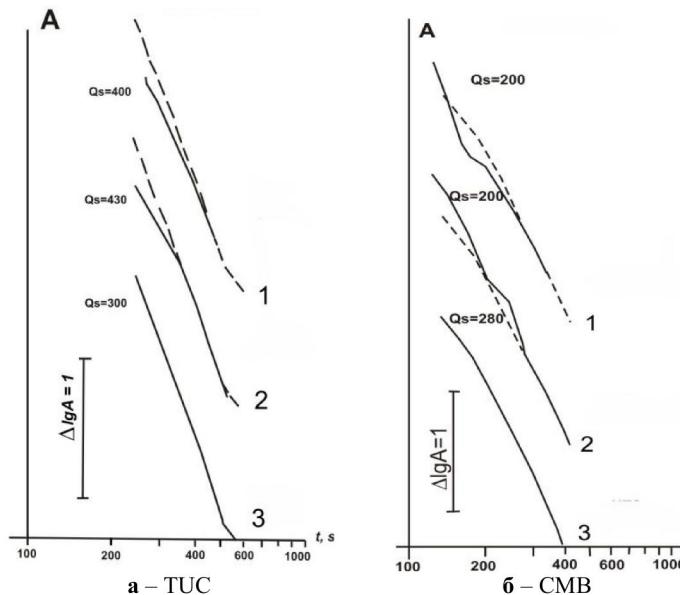
На рисунке 10а показаны огибающие коды для района полигона и его близких окрестностей по записям станции MAKZ. Величины Qs для ранней коды ($\Delta t=70$ с) уменьшаются от 350 - 370 (на расстояниях до 150 км от полигона) до 240 (непосредственно в районе ЛИП). В то же время величины Qs для поздней коды ($t=350 - 500$ с) практически одинаковы (~580 - 630).

На рисунке 11а приведена зависимость параметра Lg/Pg от эпикентрального расстояния по записям землетрясений станцией KKAR.



6 – зависимость параметра Lg/Pg от расстояния для станции TUC

О ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В РАЙОНАХ ТРЕХ КРУПНЫХ
ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ (ПО ДАННЫМ О ПОГЛОЩЕНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН)



а – 1, 2 – НИП (1 – север, 2 – юго-восток полигона), 3 – к югу от полигона;
б – 1 – к северу от НИП, 2 – к северо-западу от НИП, 3 – юго-восток полигона

Рисунок 9. НИП. Вариации огибающих коды Lg по записям станций

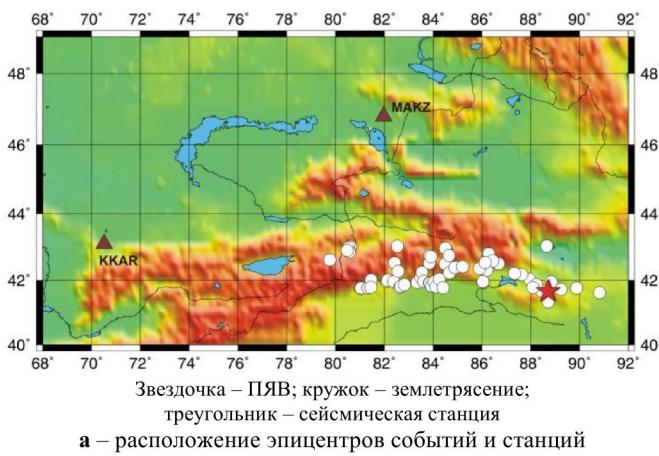
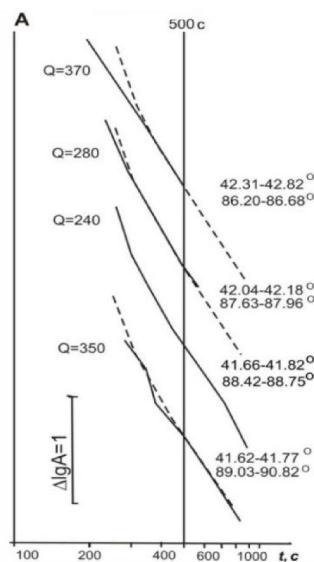


Рисунок 10. ЛИП и его ближайшее окружение. К изучению поглощения поперечных сейсмических волн

Видно, что величины Lg/Pg медленно убывают с расстоянием в диапазоне 760 - 1520 км. Заметного падения значений этого параметра в интервале расстояний, соответствующем ЛИП, не наблюдается. На рисунке 11б представлена аналогичная зависимость для параметра Sn/Pn . В этом случае величины Sn/Pn резко падают в интервале расстояний 1380 -

1520 км, соответствующем удалению ЛИП от станции KKAR.

Полученные данные свидетельствуют о том, что для района ЛИП характерно резко повышенное поглощение в верхах мантии. В то же время в земной коре полигона не наблюдается сколько-нибудь заметной аномалии поглощения поперечных волн.



б – огибающие коды Lg по записям станции MAKZ
(полигон – третья сверху кривая и пунктир)

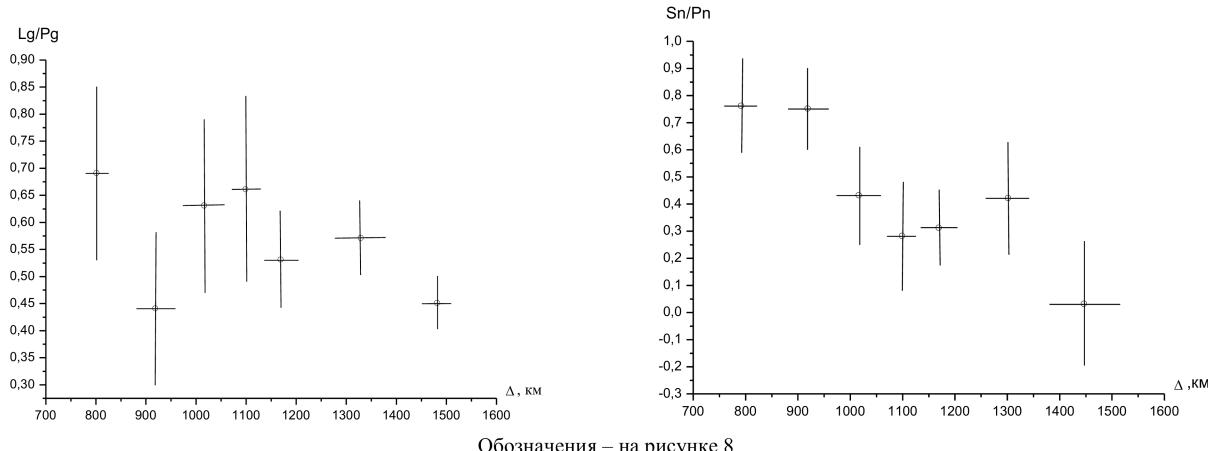


Рисунок 11. ЛИП. Зависимость от расстояния параметров, зарегистрированных станцией KKAR.: а - Lg/Pg ; б - Sn/Pn

Обсуждение

Наиболее естественное объяснение пространственно-временных вариаций поля поглощения S-волн в районах СИП и НИП может быть связано с подъемом мантийных флюидов в земную кору, обусловленным длительным интенсивным техногенным воздействием на геологическую среду [4]. Механизм этого эффекта, скорее всего, связан с резким увеличением проницаемости пород при взрывном или вибрационном воздействии [6]. Следует отметить, что увеличение проницаемости нижней части земной коры наблюдалось в районе юго-западной Японии при прохождении низкочастотных поверхностных волн от сильных и сильнейших землетрясений на расстояниях $\sim(4 - 5)$ тыс. км [7]. Можно полагать, что скорость подъема флюидов определяется, в первую очередь, проницаемостью коры и верхов мантии, а также мощностью и количеством проведенных ПЯВ. Это позволяет объяснить, почему данный процесс был наиболее активным в районе НИП, где верхи мантии, вероятно, в значительной степени «осушены», а кора насыщена флюидами. Скорее всего, этот эффект связан с относительно высокой проницаемостью коры и верхов мантии в районе

НИП, расположенном в рифтовой зоне запада США, а также с максимальным количеством крупных ПЯВ (более 800).

В районе СИП, расположенном на стабильной Казахской платформе, где было проведено меньшее количество ПЯВ (около 350), геодинамические процессы были не столь интенсивными. По этой причине насыщение земной коры флюидами происходило здесь, вероятно, в первую очередь, в окрестностях крупных разломных зон [4].

ЛИП расположен в сейсмически активном районе Восточного Тянь-Шаня, который характеризуется промежуточной проницаемостью земной коры по сравнению с рифтовой зоной Северной Америки и Казахской платформой. В то же время здесь проведено гораздо меньше ПЯВ (всего 22) по сравнению с двумя другими полигонами. Можно предполагать, что существенно менее интенсивное суммарное техногенное воздействие в районе ЛИП позволяет объяснить, почему здесь наблюдается только начальная стадия подъема флюидов. Возможно, в этом районе флюиды концентрировались в верхах мантии и пока не поднимались в значительных количествах в земную кору.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля / Ю.Ф. Копничев // М.: Наука, 1985. – 176 с.
2. 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.
3. Каазик, П.Б. Анализ тонкой структуры короткопериодных сейсмических полей по группе станций / П.Б. Каазик, Ю.Ф. Копничев, И.Л. Нерсесов, М.Х. Рахматуллин / Физика Земли. – 1990. – № 4. – С.38 – 49.
4. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе Семипалатинского полигона / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли. - 2001. – № 11. – С. 73 – 86.
5. Копничев, Ю.Ф. Анализ пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня по записям подземных ядерных взрывов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. 2004. – Т. 395. №6. – С. 818 – 821.
6. Kocharyan, C.S. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / С.С. Kocharyan, A.A. Spivak // М.: Академкнига, 2003. – 423 с.
7. Hier-Majumder, S. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs / S. Hier-Majumder., D. Kohlstedt // Geophys. Res. Lett. - 2006. – V.33. L08305. doi: 10.1029/2006GL025716.

**ҮШ ІРІ ЯДРОЛЫҚ ПОЛИГОНДАРДЫҢ АУДАНДАРЫНДА ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ ПРОЦЕССТЕРИ
ТУРАЛЫ (ҚӨЛДЕНЕЦ ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ТУРАЛЫ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША)**

^{1,2)}Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾*КР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

²⁾*PFA O.YU.Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

Үш сыйнау полигоны (Семей, Невада, Лобнор) аудандарында кыска аукымды қөлденең толқындар жұтылуы өрісінің кеңістік-уақыттық вариациялары қаралған. Lg и Pg, Sn және Pn толқындардың, сондай-ақ Lg коданың амплитудаларының қатынастарын талдау әдісі қолданылған. Семей сыйнау полигоны ауданында ядролық сыйнақтар кезі үстінде жер қыртысы мен жоғарғы мантияда толқындар жұтылуы өрісі өзгергені көрсетілген. Невада полигонында жақындағы төңірегімен салыстырғанда жер қыртысында жұтылуы жоғары болуы, мантияда төмөнделуі байкалады. Лобнор ауданында катты жұтылу аномалиясы жоғарғы мантияда болуы анықталған. Анықталған эсерлер, геологиялық ортасына ұзақ мерзімді қарқынды техногенді ықпал жасау себебінде терендері флюидтер белсенеді жылыштауымен байланысты болуы үйгартылуда.

**ON GEODYNAMICAL PROCESSES WITHIN THE AREAS OF THREE
LARGE NUCLEAR TEST SITES (BASED ON S-WAVE ATTENUATION DATA)**

^{1,2)}Yu.F. Kopnichev, ¹⁾I.N. Sokolova

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

²⁾*O.Yu. Schmidt Institute of the Earth Physics RAS, Moscow, Russia*

Spatial-time variations of attenuation field for short-period S-waves within three nuclear test sites: Semipalatinsk, Nevada and Lobnor were considered. Lg and Pg, Sn and Pn wave amplitude ratios and also Lg coda analysis methods were used. It was shown that within Semipalatinsk Test Site during nuclear tests, wave attenuation features in Earth's crust and upper mantles significantly changed. At Nevada test site in comparison with adjacent areas there is increased attenuation in the Earth's crust and decreased in the upper mantle. At Lobnor test site anomalies of strong attenuation take place in the upper mantle. It is supposed that the revealed effects were related to active deep fluid migration subjected to long-term man-made impact on geology environment.