

УДК 550.334

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНАХ ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ ЛОБНОР И НОВАЯ ЗЕМЛЯ

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

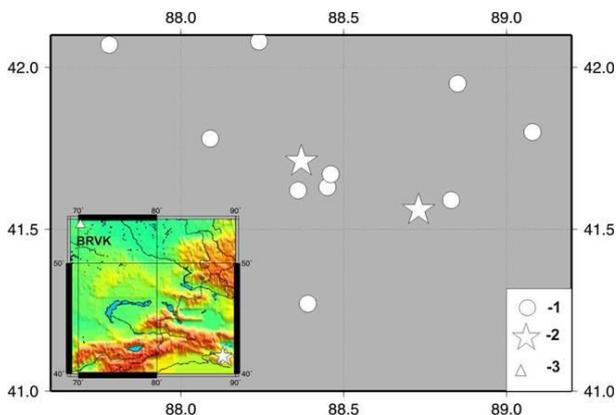
²⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Рассмотрены временные вариации поля поглощения короткопериодных поперечных волн в районах ядерных полигонов Лобнор и Новая Земля. Используются методы, основанные на анализе относительного уровня волн Sn и Pn (параметра Sn/Pn), а также наклона огибающих Р-коды. Обработано более 70 записей подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и землетрясений, полученных станциями BRVK и NORSAR. Установлено, что по записям ПЯВ, проведенных на обоих полигонах с конца 1960-х до 1990-х годов, отмечается существенное уменьшение средней величины Sn/Pn, а также увеличение наклона огибающей Р-коды. На записях землетрясений из области полигона Лобнор отмечено уменьшение со временем значения параметра Sn/Pn и после прекращения серии ПЯВ. Предполагается, что обнаруженные эффекты связаны с миграцией глубинных флюидов вследствие длительного интенсивного техногенного воздействия.

Ранее [1] выявлены существенные временные вариации поля поглощения короткопериодных поперечных волн в районе Семипалатинского испытательного ядерного полигона (СИЯП), которые связывались с миграцией глубинных флюидов в результате длительного интенсивного техногенного воздействия на геологическую среду. В данной статье рассматриваются такие вариации в районах ядерных полигонов Лобнор (ЛИЯП) и Новая Земля (НЗИЯП).

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ЛИЯП расположен в сейсмически активном районе Восточного Тянь-Шаня, где происходят землетрясения с $M > 7.0$. Здесь в период с 1969 по 1996 гг. было произведено 22 подземных ядерных взрыва (ПЯВ) с $m_b = 4.5 - 6.5$ (рисунок 1) [2]. Мощность взрывов не превышала 700 кт. В районе ЛИЯП и его близких окрестностях (в границах территории, приведенной на рисунке 1), начиная с 1969 г., зарегистрировано 15 землетрясений с $m_b = 4.5 - 5.9$.

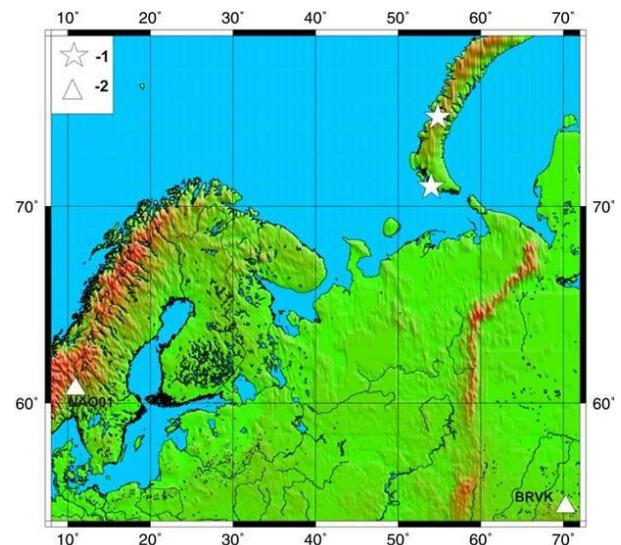


1 – эпицентры землетрясений; 2 – главные испытательные площадки проведения ПЯВ; 3 – сейсмическая станция. На врезке показано положение полигона (2) и станции BRVK (3)

Рисунок 1. Карта области ЛИЯП

Обработаны записи ПЯВ, произведенных в 1969 - 1996 гг., а также близких к полигону землетрясений, которые были получены станцией BRVK, расположенной в северном Казахстане (рисунок 1). В общей сложности обработано 26 сейсмограмм, зарегистрированных в 1969 - 2010 гг. на эпицентральных расстояниях ~1800 - 2000 км.

НЗИЯП находится в слабосейсмичном районе, где землетрясения с $m_b > 4.7$ не известны. В то же время здесь зарегистрировано в общей сложности 39 ПЯВ, включая самые мощные из проводившихся в бывшем СССР (более 1000 кт [3]). Рассмотрены записи, полученные станцией BRVK, а также норвежской группой NORSAR на эпицентральных расстояниях ~2070 - 2370 км (рисунок 2). Всего обработано 45 записей ПЯВ.

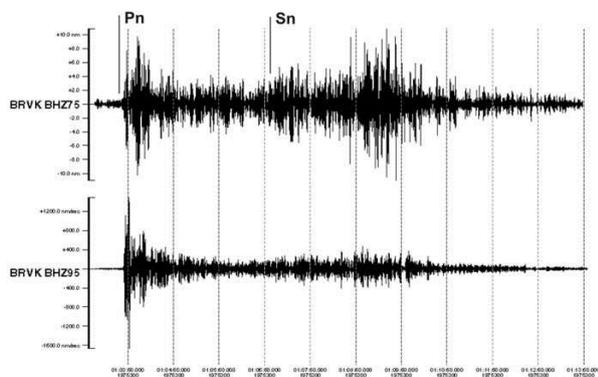


1 – испытательные площадки; 2 – сейсмические станции

Рисунок 2. Расположение испытательных площадок на НЗИЯП и сейсмических станций

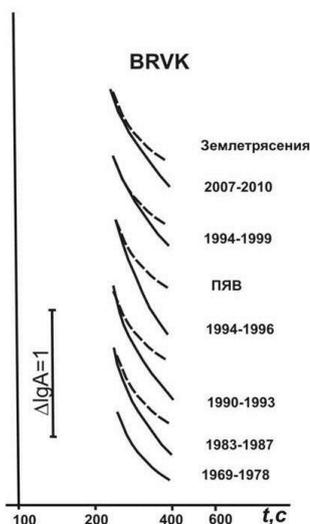
МЕТОДИКА

Использована методика, связанная с анализом отношения максимальных амплитуд в волнах Sn и Pn (параметра $lgA_{Sn/APn}$) [4]. В [5] показано, что группа Sn формируется главным образом поперечными волнами, отраженными от субгоризонтальных границ в верхней мантии. Отношение амплитуд использовано для нормировки, поскольку волны Sn и Pn распространяются по близким трассам. Дополнительно проведен анализ наклона огибающих P-коды. Как установлено ранее, кода P-волны в рассматриваемом диапазоне расстояний формируется в основном волнами, распространяющимися вблизи от лучевой плоскости, в результате обменного рассеяния типа S-P в области очага [6]. В этом случае кода-волны пересекают кору и верхи мантии в области эпицентра под более крутыми углами, чем группа волн Sn [5, 9]. Рассматривался параметр



Верхняя трасса – взрыв 27.10.1975 г., нижняя – 17.08.1995 г. Стрелка – вступления волн Pn, Sn

Рисунок 3. ЛИЯП. Примеры записей ПЯВ. Станция BRVK, канал 1.25 Гц



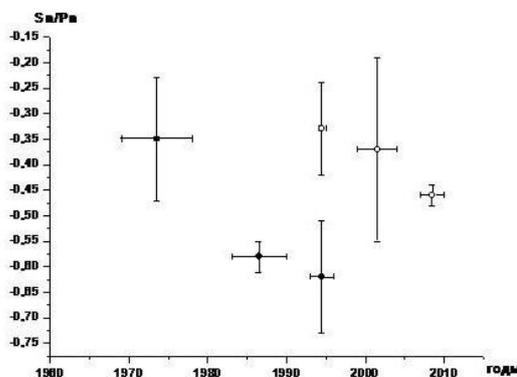
Пунктир – огибающая за период 1969 - 1978 гг. Время t отсчитывается от начала излучения в очаге

Рисунок 5. ЛИЯП. Общие огибающие P-коды для ПЯВ и землетрясений в разные интервалы времени

$lg(A_c/A_p)$, где A_c – уровень огибающей коды в фиксированный момент времени t_c , отсчитываемый от начала излучения в очаге. Далее, для краткости, названные параметры обозначены как Sn/Pn и C/P, соответственно. Поскольку поглощение существенно зависит от частоты, записи вертикальной компоненты предварительно подвергались узкополосной фильтрации (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной 2/3 октавы).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

ЛИЯП. На рисунке 3 приведены примеры записей ПЯВ, произведенных на ЛИЯП. На записи взрыва, произведенного 27.10.1975 г., группа Sn-волн имеет относительно большие амплитуды, тогда как на записи ПЯВ, полученной через 20 лет (17.08.1995 г.), отношение Sn/Pn заметно уменьшилось, а скорость затухания амплитуд в P-коде увеличилась.



Пересекающиеся отрезки: горизонтальный - интервал осреднения данных; вертикальный - стандартное отклонение. Среднее значение для ПЯВ - значок залитый; для землетрясений - незалитый

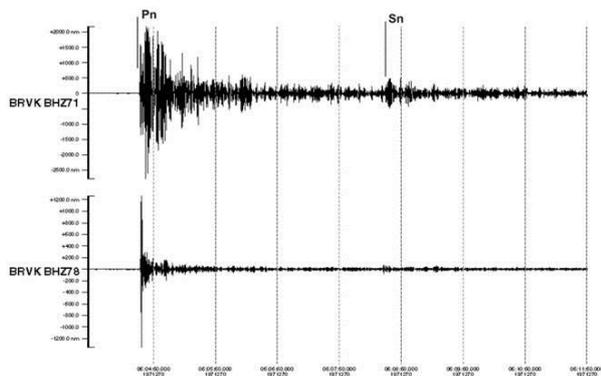
Рисунок 4. ЛИЯП. Зависимость средних величин Sn/Pn от времени

На рисунке 4 представлены графики зависимости Sn/Pn от времени для ПЯВ и землетрясений в различные отрезки времени с 1978 г. по 2010 г.

Из рисунка 4 следует, что величины Sn/Pn по записям ПЯВ убывают со временем, и в 1993 - 1996 гг. становятся в среднем ниже, чем в 1969 - 1978 гг., на 0.26 ед. лог. Интересно, что после прекращения испытаний ядерного оружия аналогичная тенденция прослеживается и по записям землетрясений: в 2007 - 2010 гг. по сравнению с периодом 1994 - 1995 гг. анализируемый параметр в среднем уменьшается на 0.13 ед. лог. Следует отметить также, что в интервале 1993 - 1996 гг. величина Sn/Pn для землетрясений выше, чем для ПЯВ, на 0.29 ед. лог. Из рисунка 5 видно, что наклон огибающих P-коды для записей ПЯВ существенно растет со временем, так что средние величины C/P при $t_c=380$ с уменьшаются с -0.54 в 1969 - 1978 гг. до -0.74 в 1994 - 1996 гг. Для записей землетрясений параметр C/P уменьшается с -0.62 в 1994 - 1999 гг. до -0.72 в 2007 - 2010 гг. По сравнению с Sn/Pn данный параметр уменьшается

со временем несколько слабее как для ПЯВ, так и для землетрясений.

НЗИЯП. На рисунке 6 приведены записи двух ПЯВ, полученные станцией BRVK (27.01.1971 г. и 10.08.1978 г.). Видно, что через 7.5 лет после первого взрыва на записи резко уменьшился относительный уровень амплитудгруппы Sn-волн, а также существенно увеличилась скорость затухания амплитуд в коде Р-волны. Рисунок 7 иллюстрирует

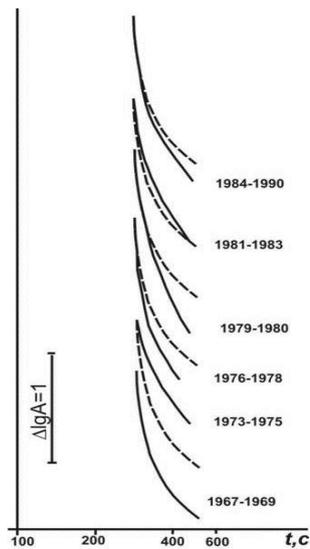


Верхняя трасса – взрыв 27.01.1971 г., нижняя – 10.08.1978 г.
Стрелки – вступления волн Pn, Sn

Рисунок 6. НЗИЯП. Примеры записей ПЯВ.
Станция BRVK, канал 1.25 Гц

На рисунке 8 показаны общие огибающие Р-коды в различные интервалы времени за 1967 – 1990 гг. по записям станции BRVK.

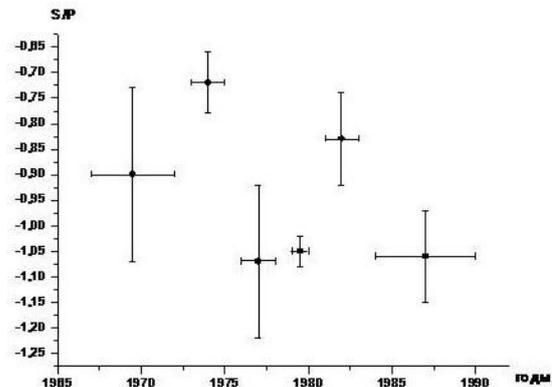
Из рисунка 8 видно, что наклон огибающих изменяется не монотонно: в 1973 – 1975 гг. и 1981 - 1983 гг. он резко уменьшился, а в остальных интервалах времени увеличился. Параметр С/Р ($t_c=400$ с) в данном случае варьируется от -0.65 в 1973 - 1975 гг. до -1.36 в 1976 - 1980 гг. Следует отметить, что, в



Пунктир – огибающая за период 1967 - 1969 гг.

Рисунок 8. НЗИЯП Общие огибающие Р-коды для ПЯВ в разные интервалы времени. Станция BRVK

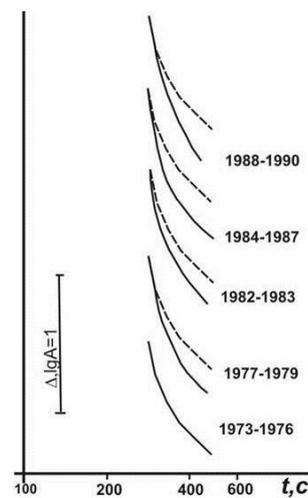
зависимость параметра Sn/Pn от времени. Из рисунка следует, что в целом величины Sn/Pn уменьшаются со временем, однако, в отличие от рисунка 4, эта зависимость немонотонная. Выделяются эпизоды роста средних величин Sn/Pn в 1973 - 1975 и 1981 - 1983 гг. (соответственно до -0.72 и -0.83), сопровождающиеся интервалами их резкого падения в 1976 - 1978 и 1984 - 1990 гг. (до -1.07 и -1.06).



Обозначения – на рисунке 4

Рисунок 7. НЗИЯП. Зависимость средних величин Sn/Pn от времени (по записям ПЯВ)

отличие от взрывов на ЛИЯП, параметр С/Р здесь изменяется значительно сильнее, чем Sn/Pn. На рисунке 9 представлены вариации формы огибающих Р-коды по данным станции NAO01, входящей в группу NORSAR. Интересно, что в данном случае в 1982 - 1983 гг. также наблюдается локальное уменьшение наклона огибающих на фоне общего его увеличения в 1973 - 1990 гг.



Пунктир – огибающая за период 1973 - 1976 гг.

Рисунок 9. НЗИЯП. Общие огибающие Р-коды для ПЯВ в разные интервалы времени. Станция NAO01

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о существенном увеличении с течением времени поглощения S-волн на трассах от испытательных полигонов до станций BRVK и NORSAR. Поскольку станции находятся в слабосейсмичных районах, характеризующихся сравнительно слабым затуханием S-волн [7], то основные вариации поля поглощения должны приходиться на земную кору и верхи мантии в областях полигонов. Анализ затухания коровой фазы L_g в районе Восточного Тянь-Шаня, приведенный в [4], показал, что поглощение S-волн в земной коре области ЛИЯП относительно слабое. Отсюда следует, что главные изменения поля поглощения наблюдаются здесь в верхах мантии.

Наиболее естественное объяснение обнаруженных эффектов связано с миграцией глубинных флюидов в литосфере [1, 8, 9]. Частично расплавленные материалы, которые также приводят к высокому поглощению S-волн, не могут подниматься относительно быстро из-за очень большой вязкости по сравнению с флюидами. Миграция флюидов, по-видимому, обусловлена резким увеличением проницаемости пород при вибрационном воздействии, которое выявлено даже в модельных экспериментах [10], а на глубинах, соответствующих нижней коре и верхам мантии, этот эффект существенно усиливается из-за архимедовой силы, стремящейся “выдавить” флюиды наверх. В этой связи следует заметить, что увеличение проницаемости нижней коры, которое приводило к ускорению подъема мантийных флюидов, наблюдалось в районе юго-западной Японии при прохождении низкочастотных волн Рэлея от сильных землетрясений даже на эпицентральных расстояниях ~4 - 5 тыс. км [11]. Из рисунка 4 следует, что в области ЛИЯП подъем флюидов продолжился и после окончания серии ПЯВ, несмотря на то, что сейсмическая энергия происшедших здесь землетрясений была значительно ниже, чем у ПЯВ. Ранее аналогичный эффект был установлен для области Семипалатинского полигона [1, 12]. Это можно объяснить инерционностью процессов подъема флюидов после нарушения равновесия, вызванного интенсивным техногенным воздействием.

Немонотонность во времени изменения параметров поля поглощения в области НЗИЯП, вероятно,

обусловлена очень большой энергией проводившихся здесь ПЯВ. Характерно, что самое резкое падение параметра Sn/Pn наблюдалось в 1976 - 1978 гг., сразу после окончания серии наиболее мощных взрывов. Можно предполагать, что здесь имели место сравнительно короткие импульсы подъема флюидов из узких диапазонов глубин. Увеличение значений параметра Sn/Pn в короткие временные отрезки, по-видимому, можно объяснить относительно быстрой миграцией флюидов в горизонтальном направлении в земной коре, характеризующейся сравнительно высокой проницаемостью пород. Это должно приводить к уменьшению поглощения S-волн на отрезке трассы в коре.

Очень большие вариации параметра C/P для области НЗИЯП (по сравнению с Sn/Pn), скорее всего, объясняются тем, что флюиды поднимаются в основном в ближайших окрестностях полигона, в связи с чем сильнее изменяются динамические характеристики волн, более круто пересекающих кору и верхи мантии. В то же время в области ЛИЯП наблюдается противоположная картина, из чего следует, что флюиды мигрируют сильнее к северо-западу от полигона. Этот вывод согласуется с данными об аномалиях поля поглощения в районе Восточного Тянь-Шаня, полученными в [13] путем анализа записей станции Маканчи (MKAR). Из рисунков 5 и 8 следует, что общий диапазон изменения величин C/P в области ЛИЯП гораздо меньше, чем в области северного полигона. Скорее всего, это объясняется значительно более интенсивным подъемом флюидов в области НЗИЯП, обусловленным во много раз большей общей энергией ПЯВ, проводившихся на этом полигоне, по сравнению с ЛИЯП.

Полученные данные являются новыми свидетельствами того, что длительное интенсивное техногенное воздействие способно приводить к изменению характеристик среды на достаточно больших глубинах в земной коре и верхней мантии. Ранее такие свидетельства были получены для областей Семипалатинского и Невадского полигонов [1, 12]. Следует отметить важность учета выявленных временных вариаций поля поглощения поперечных волн при работах по распознаванию ПЯВ и землетрясений [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Fisk, M. Accurate locations of nuclear explosions at the Lop Nor test site using alignment of seismograms and ICONOS satellite imagery / M. Fisk // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2002. – V. 92. N 8. – P. 2911 - 2525.
3. Михайлов, В. Н. Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР, 1949 - 1990. / В. Н. Михайлов // Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996. – 68 с.
4. Копничев, Ю. Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в земной коре и верхих мантии в районе полигона Лобнор / Ю. Ф. Копничев, И. Н. Соколова // Докл. РАН. 2008. – Т. 420, № 2. – С. 239 - 242.
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. Koper, K. Array analysis of regional-distance P-coda in South Asia / K. Koper, A. Fatehi // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2009. – V. 99. N 4. – P. 2509 - 2522.
7. Шукин, Ю. К. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР. / Ю. К. Шукин [и др.] // М.: Наука, 1987. – 238 с.
8. 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. 25 - 34.
9. 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.
10. Барабанов, В. Л. О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений / В. Л. Барабанов [и др.] // Докл. РАН, 1987.– Т. 297. № 1. – С. 53 - 56.
11. Miyazawa, M. Evidence suggesting fluid flow beneath Japan due to periodic seismic triggering from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake / M. Miyazawa, J. Mori // Geophys. Res. Lett. 2006. – V. 33. L05303.
12. Копничев, Ю. Ф. О геодинамических процессах в районах трех ядерных полигонов / Ю. Ф. Копничев, И. Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 48 - 54.
13. Копничев, Ю. Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня и их связь с сейсмичностью / Ю. Ф. Копничев, И. Н. Соколова // Докл. РАН, 2012. – Т. 442, № 6. – С. 821 - 824.
14. Копничев, Ю. Ф. Исследования по сейсмическому распознаванию ядерных взрывов на полигоне Лобнор / Ю. Ф. Копничев, О. М. Шепелев, И. Н. Соколова И. Н. // Физика Земли, 2001. – № 12 – С. 64 - 77.

ЛОБНОР ЖӘНЕ НОВАЯ ЗЕМЛЯ ЯДРОЛЫҚ ПОЛИГОНДАРЫ АУДАНЫНДАРЫНДА S – ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ УАҚЫТТЫЛЫҚ ВАРИАЦИЯЛАРЫ

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾РҒА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей

²⁾ҚР ҰАО Геофизикалық зерттелері институты, Курчатова, Қазақстан

Лобнор және Новая Земля ядролық полигондардың аудандарында қысқапериодты көлденең толқындар жұтылу өрісінің сипаттамалары мен динамикасы қаралған. Sn және Pn толқындардың салыстырмалы деңгейін (Sn/Pn параметрлері), сондай-ақ P-коданың орайжанауыштары енісін талдауында негізделген әдістері пайдаланылған. Жерасты ядролық жарылыстар (ЖЯЖ) мен жерсілкінулердің BRVK және NORSAR станцияларымен алынған 70 астам жазбалары өңделген. Полигондардың екеуінде де 1960 ж.ж. аяғынан 1990 ж.ж. дейін жүргізілген ЖЯЖ жазбалары бойынша Sn/Pn орта мәні едәуір төмендеуі көрінетіні, сондай-ақ P-коданың орайжанауыштар енісі артуы анықталған. Лобнор полигоны облысынан жерсілкінулердің жазбаларында уақыт ағымында Sn/Pn параметрінің мәндері ЖЯЖ серияларын тоқтақаннан кейін де төмендеуі белгіленеді. Айқындалған әсерлері көп ұзақты белсенді техногендік ықпал жасалуында тереңдегі флюидтердің жылыстауымен байланысты болуы болжамда.

TEMPORAL VARIATIONS OF S WAVE ATTENUATION FIELD IN THE REGIONS OF LOP NOR AND NOVAYA ZEMLYA NUCLEAR TEST SITES

¹⁾Yu.F. Kopnichev, ²⁾I.N. Sokolova

¹⁾Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²⁾Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

We have been studying characteristics of shear wave attenuation field in the regions of nuclear test sites Lop Nor and Novaya Zemlya. We used methods, based on an analysis of relative level of Sn and Pn waves (parameter Sn/Pn), and also a slope of P-coda envelopes. More than 70 recordings of underground nuclear explosions (UNEs) and earthquakes, obtained by stations BRVK and NORSAR, have been processed. It was established, that since the end of 1960s till 1990s mean values Sn/Pn diminished essentially, and P-coda envelope slope increased in the areas of both test sites. In the area of Lop Nor test site diminishing Sn/Pn parameter with time on the earthquake recordings was observed also after finishing the UNEs series. We suppose, that the effects discovered are connected with deep fluid migration as a result of protracted intense anthropogenic influence.