

УДК 550.334

Пространственно–временные вариации поля поглощения короткопериодных *S*-волн в районе северокорейского ядерного полигона Пунгери

© 2025 г. Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия; ²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 09.07.2025 г.

Аннотация. Рассматриваются пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе северокорейского ядерного полигона Пунгери. Обрабатываются записи подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и землетрясений, полученные двумя станциями (VLA и MDJ) на расстояниях до 400 км. Определяются отношения максимальных амплитуд в группах *Lg* и *Pg* для частоты 1.25 Гц (параметры *Lg/Pg*). Показано, что по записям ПЯВ величины параметров *Lg/Pg* резко уменьшаются с 2006 по 2017 год. Предполагается, что этот эффект связан с подъёмом глубинных флюидов в литосфере, обусловленным интенсивным техногенным воздействием ПЯВ на земную кору. Установлено, что средние величины параметра *Lg/Pg* существенно выше для афтершоков ПЯВ, чем для взрывов. Проводится сопоставление характеристик полей поглощения в областях полигона Пунгери и Семипалатинского полигона.

Ключевые слова: ядерные полигоны, взрывы и землетрясения, волны *Lg* и *Pg*, глубинные флюиды.

Для цитирования: Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных *S*-волн в районе северокорейского ядерного полигона Пунгери // Российский сейсмологический журнал. — 2025. — Т. 7, № 3. — С. 25–30. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.3.02>. — EDN: IIFCIY

Введение

В работах [Kopnichen, Sokolova, 2001; Kopnichen, Sokolova, 2022; Kopnichen et al., 2013; Berezhina et al., 2024] показано, что в районах трёх крупнейших ядерных полигонов (Невадский (США), Семипалатинский (бывший СССР), Лобнор (КНР)) наблюдались существенные пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных поперечных волн, скорее всего связанные с миграцией глубинных флюидов. При этом характер таких вариаций существенно различался в зависимости от тектонических особенностей районов, а также от количества и мощности использовавшихся ядерных зарядов. В настоящей работе проводится анализ характеристик поля поглощения в районе сравнительно небольшого ядерного полигона Пунгери, расположенного вблизи северной границы КНДР. Для сравнения рассматриваются некоторые характеристики записей ПЯВ на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП).

Краткая геолого-геофизическая характеристика района исследований

Пунгери — испытательный полигон ядерного оружия на территории КНДР, располагается в гористой местности недалеко от вулкана Пэктусан (Байтоушань) (рис. 1). Вулкан образовался в плиоцене, затем его деятельность возобновилась в голоцене. Были извержения и в историческое время, они отмечены в китайских летописях 1597, 1702 и 1898 гг. В настоящее время в озере, расположенном в кальдере на вершине стратовулкана, происходит выделение горячих вод и газов. Расстояние от полигона до Японского моря составляет около 50 км, до вулкана Пэктусан — около 110 км. На полигоне преобладают граниты юрского возраста с вкраплениями диорита, доломита, известняка, гнейса и кварцевых порфиров.

На территории полигона с 2006 по 2017 г. проведено шесть подземных ядерных взрывов (ПЯВ), мощность которых возрастала со временем

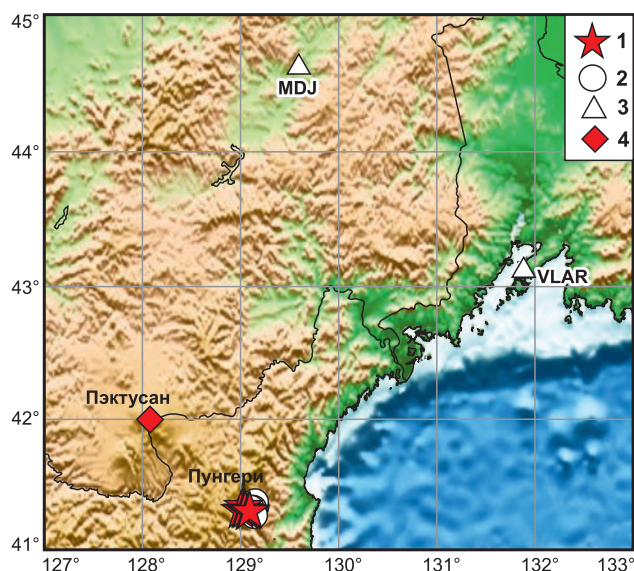


Рис. 1. Карта района исследований.

1 — эпицентры ПЯВ на Пунгери, 2 — эпицентры афтершоков, 3 — сейсмические станции, 4 — вулкан Пэктусан

[Adushkin et al., 2021; Адушкин и др., 2025]. После двух самых сильных ПЯВ, проведенных 9 сентября 2016 г. и 3 сентября 2017 г., наблюдалось большое количество сравнительно слабых афтершоков. На рис. 2 представлена зависимость магнитуд сейсмических событий из района полигона Пунгери от времени. Видно, что наблюдается значительный рост количества землетрясений в последние годы (более семи лет), в то время как длительности афтершоковых последовательностей при ПЯВ обычно не превышают 25 месяцев [Adushkin, Spivak, 1995].

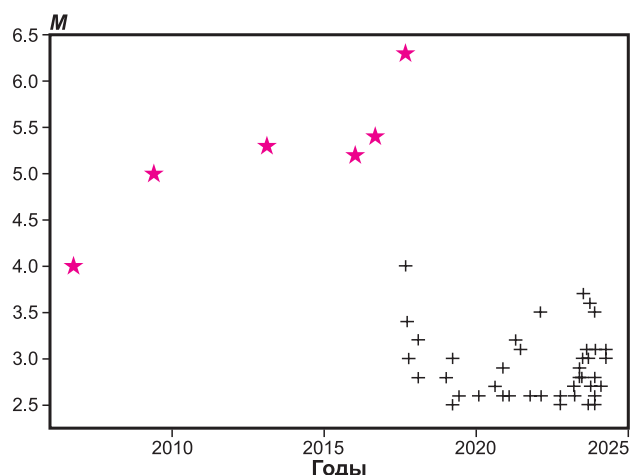


Рис. 2. Реализация сейсмических событий из района полигона Пунгери во времени.

Звёздочки — ПЯВ, крестики — землетрясения

Материалы и методика исследований

В работе использованы записи двух сейсмических станций (VLA и MDJ), расположенных в России и КНР на расстояниях от полигона Пунгери ~320 и 370 км соответственно (рис. 1). Обработаны записи шести ПЯВ и 11 землетрясений, зарегистрированных в 2006–2024 гг.

Было проведено сопоставление характеристик поля поглощения для двух полигонов: Пунгери и СИП. Для области СИП использованы записи ПЯВ, которые были получены станцией TLG, установленной в районе Северного Тянь-Шаня (рис. 3). Отметим, что для трасс от СИП к станции TLG волны L_g распространяются по стабильной Казахской платформе, литосфера которой характеризуется сравнительно слабым поглощением короткопериодных поперечных волн [Kornichev, Sokolova, 2001]. В общей сложности было обработано более 200 записей, полученных на расстояниях ~730–770 км.

Для учёта зависимости добротности от частоты колебаний проводилась узкополосная фильтрация вертикальных компонент сейсмограмм (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной 2/3 октавы, аналогичный ЧИСС-фильтру [Копничев, 1985]). По записям ПЯВ и землетрясений находились отношения максимальных амплитуд в группах P_g и L_g (параметр $\lg(A_{L_g}/A_{P_g})$, который для краткости будем обозначать как Lg/Pg).

Анализ данных и обсуждение

На рис. 4 показаны записи шести ПЯВ, полученные станцией VLA. Видно, что для записей ПЯВ в 2006–2009 гг. уровень группы L_g значительно выше, чем P_g , а в 2017 г. наблюдается противоположная картина.

На рис. 4 представлены зависимости параметров Lg/Pg от времени по записям станции VLA. Видно, что с 2006 по 2017 г. по данным станции VLA имело место монотонное падение величин Lg/Pg от 0.42 до –0.26 ед. лог. По данным станции MDJ, величины Lg/Pg также падали со временем, особенно резко в 2016–2017 гг. (от 0.20 до –0.20 ед. лог.).

По записям афтершоков двух сильнейших ПЯВ, произошедших в 2017–2024 гг. [Адушкин и др., 2025] и зарегистрированных станцией VLA, были оценены средние величины параметров Lg/Pg : 0.58 ± 0.09 ед. лог. Из рис. 5 следует, что эти величины значительно (на 0.68 ед. лог.) выше, чем средние для ПЯВ за 2016–2017 гг. Аналогичный результат получен по данным для станции

MDJ — средние величины Lg/Pg выше для афтершоков за 2017–2024 гг. по отношению к трём ПЯВ за 2016–2017 гг. на 0.28 ед. лог. (рис. 5).

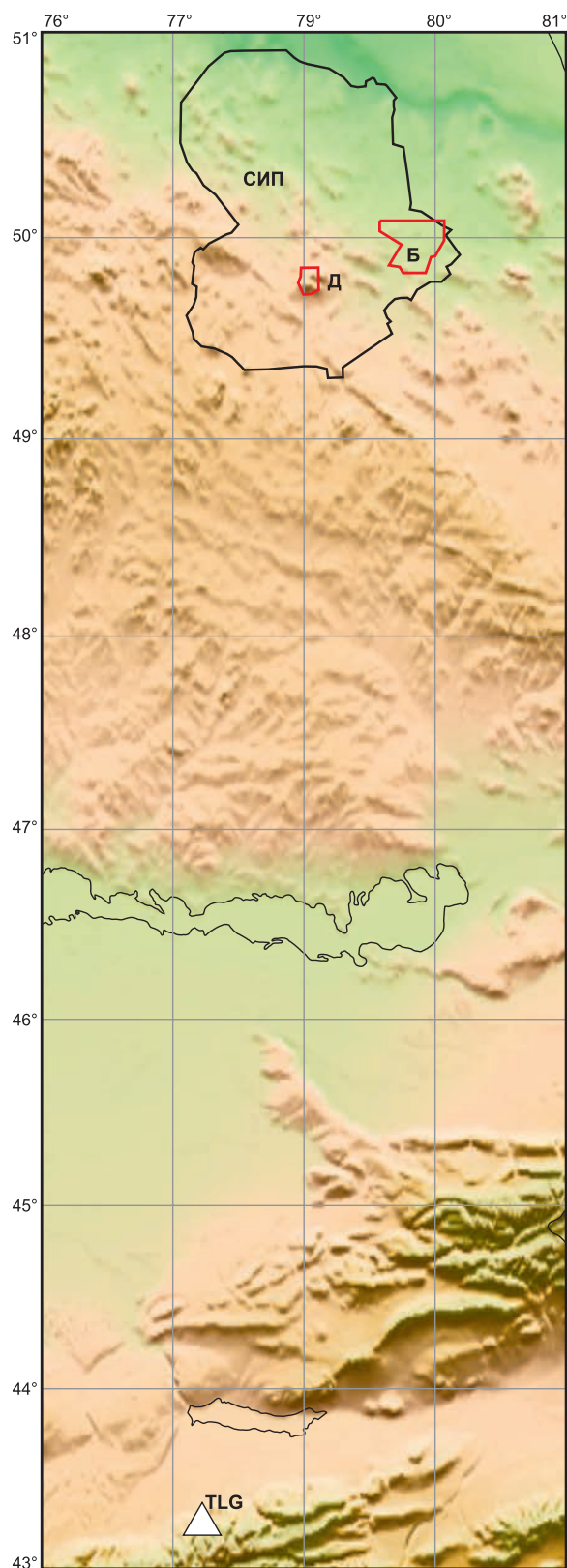


Рис. 3. Расположение площадок «Дегелен» и «Балапан» на СИП и станции TLG

На рис. 6 представлены временные вариации параметра Lg/Pg для ПЯВ на двух главных площадках СИП: «Дегелен» и «Балапан». Для ПЯВ на «Дегелене» с середины 1960-х до конца 1970-х гг. средние величины Lg/Pg заметно выросли (до 0.80 ед. лог.); далее, до конца 1980-х гг. они оставались примерно на одном уровне. В то же время для «Балапана», начиная с 1980 г., наблюдается постепенное уменьшение величин Lg/Pg , в среднем они падают к концу 1980-х гг. на 0.4–0.5 ед. лог., опускаясь примерно до 0.1. В связи с этим в конце 1980-х гг. различие средних значений данного параметра для ПЯВ на «Дегелене» и «Балапане» достигает 0.6 ед. лог. Важно отметить, что минимальные значения Lg/Pg для полигона Пунгери значительно ниже, чем для площадки «Балапан» и тем более для «Дегелена».

Группа Lg представляет совокупность за пределами отражённых от границы Мохоровичича поперечных волн [Копничев, 1985], а Pg — продольные волны, распространяющиеся в земной коре. В связи с этим параметр Lg/Pg может служить мерой интегрального поглощения короткопериодных S-волн в земной коре. Резкое падение величин Lg/Pg для ПЯВ на полигоне Пунгери со временем объясняется, скорее всего, подъёмом глубинных флюидов в литосфере в области полигона, связанным с интенсивным техногенным воздействием на земную кору. Некоторую роль может также играть миграция расплавов в коре, поскольку полигон находится поблизости от вулкана Пэктусан. Однако эта роль, вероятно, не слишком значительна, поскольку вязкость флюидов на много порядков меньше вязкости расплавов или просто разогретых пород.

Различие параметров Lg/Pg для ПЯВ и афтершоков связано с особенностями очагового излучения: очевидно, что при землетрясениях гораздо большая доля энергии излучается в виде поперечных волн.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на трассах от полигона Пунгери в 2016–2017 гг., несмотря на значительно меньшее эпицентрально-расстояние, наблюдалось существенно более высокое затухание S-волн в земной коре, чем на трассах от СИП к Северному Тянь-Шаню до конца 1980-х гг., в первую очередь для площадки «Дегелен». Для объяснения этого эффекта, на наш взгляд, можно предположить, что в земной коре в окрестностях полигона Пунгери имеет место гораздо более высокое содержание флюидов, чем в области СИП. В пользу данной гипотезы свидетельствует существование на сравнительно небольших расстояниях

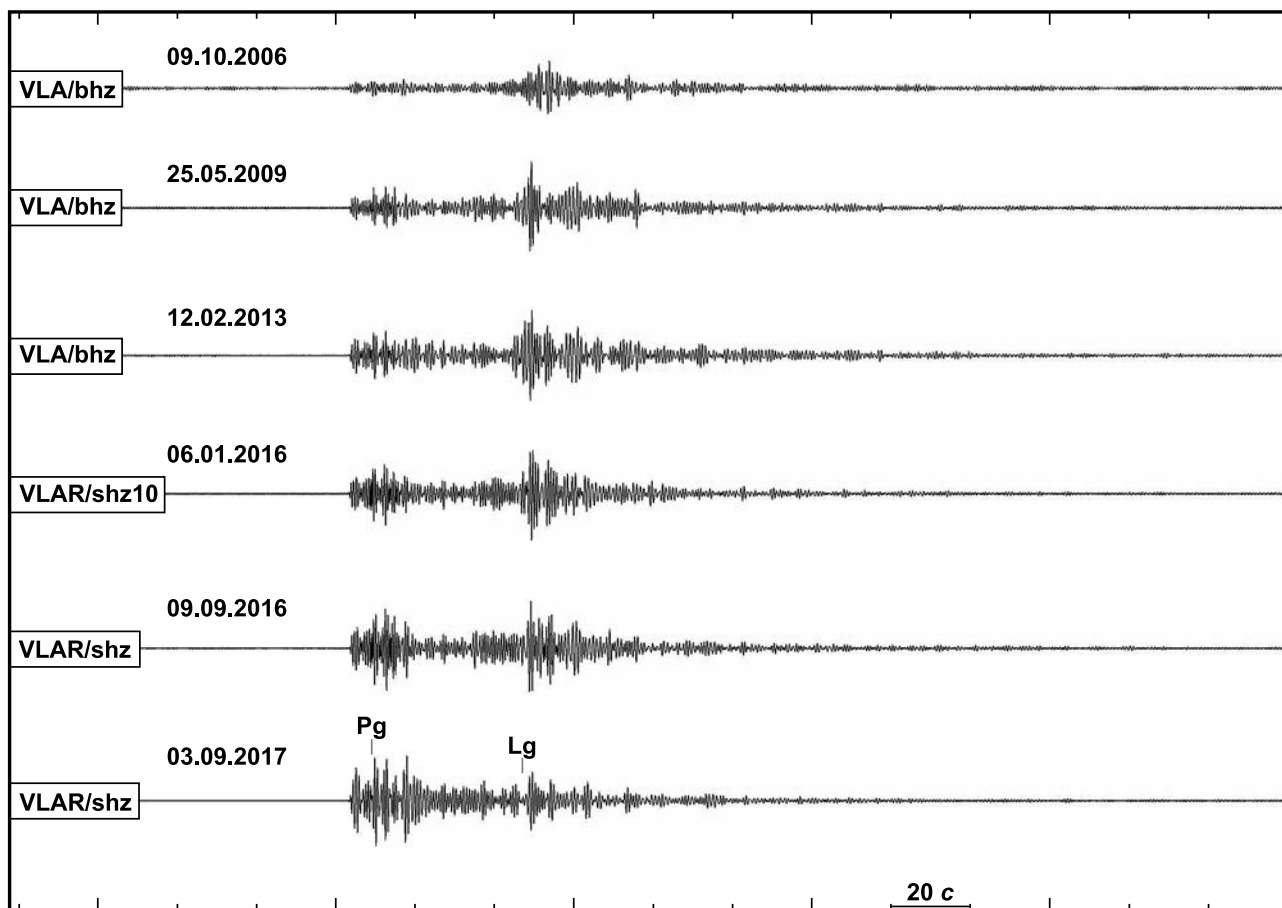


Рис. 4. Сейсмограммы ПЯВ, полученные станцией VLA. Вертикальная компонента, канал 1.25 Гц.

Отмечены вступления волн Lg и Pg

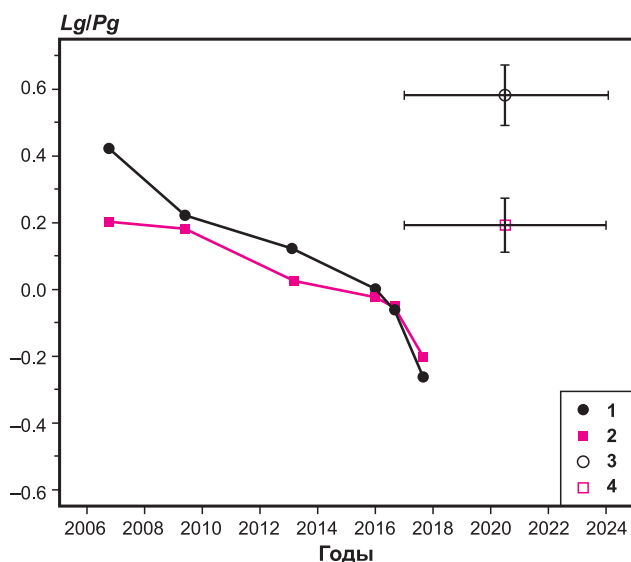


Рис. 5. Зависимость параметра Lg/Pg от времени.

1 – ПЯВ (VLA), 2 – ПЯВ (MDJ), 3 – землетрясения (VLA), 4 – землетрясения (MDJ). Для землетрясений показаны средние значения, стандартные отклонения и диапазон времени

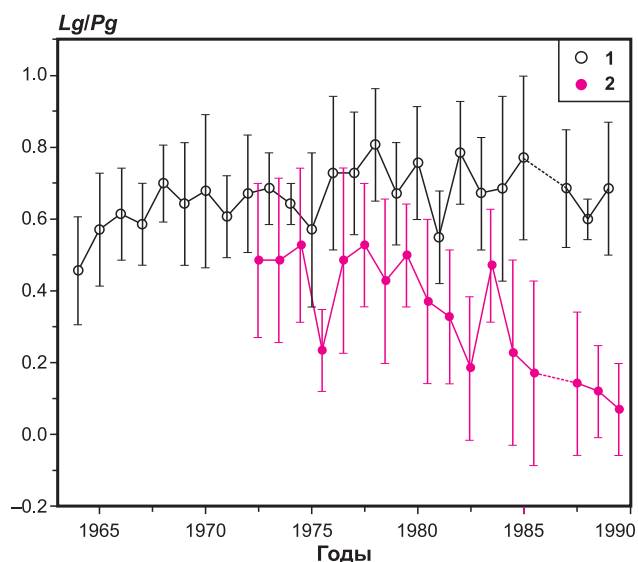


Рис. 6. Временные вариации параметра Lg/Pg по записям станции TLG.

1 – площадка «Дегелен», 2 – «Балапан». Показаны средние значения и стандартные отклонения

от полигона вулкана Пэктусан, извержения которого наблюдались в историческое время, а также резкое падение параметра Lg/Pg со временем для трасс от полигона к станциям VLA и MDJ. Кроме того, как показано в работе [Шукин, Рябой, 1987], поглощение короткопериодных S-волн в континентальной литосфере в целом увеличивается по мере приближения к границам морей и океанов.

Заключение

Рассматривались пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе северокорейского ядерного полигона Пунгери. Обработывались записи ПЯВ и землетрясений, полученные двумя станциями: VLA и MDJ на расстояниях до 400 км. Определялись отношения максимальных амплитуд в группах Lg и Pg для частоты 1.25 Гц (параметры Lg/Pg). Установлено, что по записям ПЯВ величины параметров Lg/Pg резко уменьшались с 2006 по 2017 год. Предполагается, что этот эффект связан с подъёмом глубинных флюидов в литосфере, обусловленным интенсивным техногенным воздействием ПЯВ на геологическую среду. Кроме того, показано, что средние величины параметра Lg/Pg существенно выше для афтершоков ПЯВ, чем для взрывов, что объясняется большей долей энергии S-волн, генерируемых при землетрясениях. Проведено сопоставление характеристик полей поглощения в областях полигона Пунгери и Семипалатинского полигона.

Работа выполнена при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан», а также при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Благодарности. Сейсмические данные сети IC были загружены через веб-службу EarthScope Consortium (<http://ds.iris.edu/mda>): IC (New China Digital Seismograph Network) [New China ..., 2025].

Литература

- Адушкин В.В., Китов И.О., Санина И.А. Афтершоковая эмиссия на полигоне КНДР Пунгери продолжается // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2025. — Т. 521, № 4. — С. 123–127.
- Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. — М.: Наука, 1985. — 176 с. — EDN: YSXBTK
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Семипалатинского испытательного полигона (по записям ядерных и химических взрывов) // Геофизические процессы и биосфера. — 2022. — Т. 21, № 4. — С. 44–52. — DOI: 10.21455/GPB2022.4-3. — EDN: NFIOGF
- Шукин Ю.К., Рябой В.З. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР. — М.: Наука, 1987. — 238 с.
- Adushkin V., Spivak A. Aftershock of underground nuclear explosion, in earthquakes induced by underground nuclear explosions: Environmental and ecological problems / Eds. R. Console, A. Nikolaev. — Berlin: Springer-Verlag, 1995. — P. 35–49.
- Adushkin V.V., Kitov I.O., Sanina I.A. Clusterization of aftershock activity of underground explosions in North Korea // Doklady Earth Sciences. — 2021. — V. 501, N 1. — P. 955–958. — DOI: 10.1134/S1028334X21110039. — EDN: OOROMJ
- Berezina A., Sokolova I., Kopnichev Yu., Pershina E., Nikitenko T. Features of the waveforms of nuclear explosions and earthquakes from the Lop Nor test site area according to the data of seismic stations in Central Asia // Pure and Applied Geophysics. — 2024. — DOI: 10.1007/s00024-024-03482-4
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N., Sokolov K.N. Spatio-temporal variations in the structure of the attenuation field of the S-wave in the region of Nevada nuclear test site // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2013. — V. 49, N 6. — P. 786–795. — DOI: 10.1134/S1069351313060086. — EDN: SKZQMD
- Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Space-time variations in the attenuation field structure of S waves at the Semipalatinsk test site // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2001. — V. 37, N 11. — P. 928–941. — EDN: LGVMLX
- New China Digital Seismograph Network (NCDSN) // International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]. — DOI: 10.7914/SN/IC (дата обращения 01.03.2025).

Сведения об авторах

Копничев Юрий Федорович, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: yufk777@mail.ru

Соколова Инна Николаевна, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., зав. лаб. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: SokolovaIN@gsras.ru

Spatio-temporal variations of short-period S waves attenuation field structure in the region of North-Korean Pungeri nuclear test site

© 2025 Yu.F. Kopnichev¹, I.N. Sokolova²

¹IPE RAS, Moscow, Russia; ²GS RAS, Obninsk, Russia

Received July 9, 2025

Abstract We have been studying spatio-temporal variations of shear wave attenuation field structure in the area of North-Korean Pungeri nuclear test site. We processed recordings of underground nuclear explosions (UNEs), obtained by two stations: VLA and MDJ at distances up to 400 km. The ratios of maximum amplitudes of Lg and Pg waves for frequency of 1.25 Hz (Lg/Pg parameters) were determined. It was shown that values of Lg/Pg parameters for UNEs recordings diminished abruptly from 2006 to 2017. It is supposed that this effect is connected with ascending deep-seated fluids in the lithosphere, stipulated by intensive artificial influence of the UNEs onto the earth's crust. It was established that mean values Lg/Pg are higher essentially for the UNEs aftershocks than for the explosions. A comparison of the attenuation field characteristics in the regions of the Pungeri and Semipalatinsk test sites is carried out.

Keywords Nuclear test sites, explosions and earthquakes, waves Lg and Pg, deep-seated fluids.

For citation Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2025). [Spatio-temporal variations of short-period S waves attenuation field structure in the region of North-Korean Pungeri nuclear test site]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(3), 25-30. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.3.02>. EDN: IIFCIY

References

- Adushkin, V., & Spivak, A. (1995). *Aftershock of underground nuclear explosion, in earthquakes induced by underground nuclear explosions: Environmental and ecological problems*, eds. R. Console and A. Nikolaev (pp. 35-49). Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Adushkin, V.V., Kitov, I.O., & Sanina, I.A. (2021). Clusterization of aftershock activity of underground explosions in North Korea. *Doklady Earth Sciences*, 501(1), 955-958. DOI: [10.1134/S1028334X21110039](https://doi.org/10.1134/S1028334X21110039). EDN: OOROMJ
- Adushkin, V.V., Kitov, I.O., & Sanina, I.A. (2025). [After-shock emission at North Korean Pungeri test site continues]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle* [Doklady Earth Sciences], 521(4), 123-127. (In Russ.).
- Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. (1992). *New China Digital Seismograph Network* [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. DOI: [10.7914/SN/IC](https://doi.org/10.7914/SN/IC) (Accessed 2025.03.01).
- Berezina, A., Sokolova, I., Kopnichev, Yu., Pershina, E., & Nikitenko, T. (2024). Features of the waveforms of nuclear explosions and earthquakes from the Lop Nor test site area according to the data of seismic stations in Central Asia. *Pure and Applied Geophysics*. DOI: [10.1007/s00024-024-03482-4](https://doi.org/10.1007/s00024-024-03482-4)
- Kopnichev, Y.F., Sokolova, I.N., & Sokolov, K.N. (2013). Spatio-temporal variations in the structure of the attenuation field of the S-wave in the region of Nevada nuclear test site. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(6), 786-795. DOI: [10.1134/S1069351313060086](https://doi.org/10.1134/S1069351313060086). EDN: SKZQMD
- Kopnichev, Yu.F. (1985). *Korotkoperiodnye seismicheskie volnovye polia* [Short-period seismic wave fields]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 176 p. (In Russ.). EDN: YSXBTK
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2001). Space-time variations in the attenuation field structure of S waves at the Semipalatinsk test site. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 37(11), 928-941. EDN: LGVMLX
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2022). [Space-time variations of short-period S-wave attenuation field in the region of Semipalatinsk test site (Using recordings of nuclear and chemical explosions)]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera* [Geophysical processes and the biosphere], 21(4), 44-52. (In Russ.). DOI: [10.21455/GPB2022.4-3](https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-3). EDN: NFIOGF
- Shchukin, Yu.K., & Ryaboy, V.Z. (1987). *Glubinnoe stroenie slaboseismichnykh regionov SSSR* [Deep structure of weakly seismic regions of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 238 p. (In Russ.).

Information about authors

Kopnichev Yuri Fedorovich, Dr., Professor, Chief Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: yufk777@mail.ru

Sokolova Inna Nikolayevna, Dr., Chief Researcher, Head of the Laboratory of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: SokolovaIN@gsras.ru