



MAPPING OF S-WAVE ATTENUATION FIELD USING THE CODA ENVELOPES OF LOCAL EARTHQUAKES AND QUARRY BLASTS FOR THE EAST KAZAKHSTAN REGION ON THE DATA FROM PERMANENT AND TEMPORARY SEISMIC STATIONS

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

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

² Obninsk Seismological Centre, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave, Obninsk 249035, Russia

ABSTRACT. The paper considers the heterogeneities of short-period shear waves attenuation field in the east Kazakhstan lithosphere including the region of the Semipalatinsk Test Site where a lot of test detonations of nuclear weapons were performed underground in the past. The common S-waves coda envelopes were obtained by the records of near calibration explosions and quarry blasts as well as local earthquakes on the data from permanent and temporary stations. The obtained data allowed us to create attenuation field sections in the lithosphere of the considered region. The attenuation field heterogeneities were mapped for the lower crust and uppermost mantle of the east Kazakhstan. Very low Q-factor values ($Q_s \sim 40-55$) correspond to several stations installed in the area of the Balapan test site where the most powerful test explosions were conducted. These values are much lower than the minimum values corresponding to a large number of stations installed in seismically active region of the Northern Tien Shan. It is supposed that this is due to upwelling of deep-seated fluids along the active fault zones under a long-term intensive vibration effect. The obtained data can be used to reveal the zones having high concentration of fluids in the lithosphere parts of probable large earthquake generation. This information is quite important due to the planned construction of nuclear power plant in the east Kazakhstan region.

KEYWORDS: Semipalatinsk test site; calibration and quarry blasts; underground nuclear explosions; S-waves; attenuation; quality factor; deep-seated fluids

FUNDING: The study was conducted as part of the state assignment FMWU-2022-0003 for the IPE RAS and the state assignment 075-01271-23 for the FRC GS RAS.



SHORT COMMUNICATION

Correspondence: Yuri F. Kopnichev, yufk777@mail.ru

Received: March 14, 2023

Revised: March 27, 2023

Accepted: April 11, 2023

FOR CITATION: Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N., 2023. Mapping of S-Wave Attenuation Field Using the Coda Envelopes of Local Earthquakes and Quarry Blasts for the East Kazakhstan Region on the Data from Permanent and Temporary Seismic Stations. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0713. doi:10.5800/GT-2023-14-4-0713

КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН ПО КОДЕ ЗАПИСЕЙ МЕСТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ РАЙОНА ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА ПО ДАННЫМ СТАЦИОНАРНЫХ И ВРЕМЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

² ЦО ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, 249035, Обнинск, пр-т Ленина, 189, Россия

АННОТАЦИЯ. Рассматриваются неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Восточного Казахстана, в том числе в области Семипалатинского испытательного полигона, где проводилось большое количество подземных ядерных взрывов. Получены общие огибающие коды S-волн по записям близких калибровочных и карьерных взрывов, а также местных землетрясений по данным стационарных и временных станций. По этим данным построены разрезы поля поглощения в литосфере рассматриваемого района. Проведено картирование неоднородностей поля поглощения в нижней коре и верхах мантии Восточного Казахстана. Очень низкие величины добротности ($Q_s \sim 40-55$) соответствуют нескольким станциям, установленным в области площадки Балапан, где проводились наиболее мощные взрывы. Эти величины значительно ниже, чем минимальные значения, соответствующие большому количеству станций, установленных в сейсмически активном районе Северного Тянь-Шаня. Предполагается, что данный эффект связан с подъемом глубинных флюидов по зонам активных разломов в условиях длительного интенсивного вибрационного воздействия. Полученные данные могут быть использованы для выделения зон с высоким содержанием флюидов в литосфере, в которых возможна подготовка сильных землетрясений. Такая информация весьма важна в связи с планируемым строительством атомной электростанции в районе Восточного Казахстана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Семипалатинский испытательный полигон; калибровочные и карьерные взрывы; подземные ядерные взрывы; S-волны; поглощение; добротность; глубинные флюиды

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование подготовлено в рамках выполнения государственного задания ИФЗ РАН по теме FMWU-2022-0003, государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01271-23.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе проводится изучение неоднородностей поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Восточного Казахстана, в котором расположен Семипалатинский испытательный полигон (СИП), где проводились сотни мощных подземных ядерных взрывов (ПЯВ). По характеристикам поля поглощения S-волн можно судить о содержании глубинных флюидов в земной коре и верхах мантии [Molnar, Oliver, 1969; Kopnichen, 1985; Kopnichen, Arakelyan, 1988]. Такая информация важна для анализа геодинамических процессов в литосфере, в том числе связанных с подготовкой сильных землетрясений [Kopnichen, Sokolova, 2001, 2012, 2019; Kopnichen et al., 2009].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В статье использованы записи местных землетрясений и химических взрывов (калибровочных и карьерных), полученные стационарными и временными станциями на небольших эпицентральных расстояниях (до нескольких десятков километров). В районе СИП обрабатывались главным образом данные временных станций на площадке Балапан, где проводились наиболее мощные ПЯВ (рис. 1). Кроме того, рассматривались записи, полученные стационарными станциями KURK и KURBV (в районе СИП), а также станциями MAKZ и MKAR, установленными вблизи границы

Западного Алтая. На рис. 2 представлены разломные зоны, проходящие через территорию СИП и рядом с ней. Наиболее крупные из них – Чинрауская, Калба-Чингизская и Главная Чингизская.

Картирование поля поглощения S-волн проводилось по характеристикам короткопериодной коды. Ранее было показано, что на частотах около 1 Гц кода сформирована главным образом поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в коре и верхней мантии [Kopnichen, 1985; Aptikaeva, Kopnichen, 1993]. В этом случае участки крутого и пологого наклона огибающей коды соответствуют проникновению S-волн в области сильного и слабого поглощения. Глубины таких областей оцениваются из простых геометрических соображений в предположении формирования коды однократно отраженными поперечными волнами [Kopnichen, 1985; Aptikaeva, Kopnichen, 1993]. Предварительно проводилась частотная фильтрация вертикальных компонент записей (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной 2/3 октавы [Kopnichen, 1985]). Эффективная добротность Q_s определялась по формуле:

$$A(t) \sim \exp(-\pi t / Q_s T) / t, \quad (1)$$

где t – время от начала излучения, T – период колебаний. Следует отметить, что в некоторых случаях амплитуды

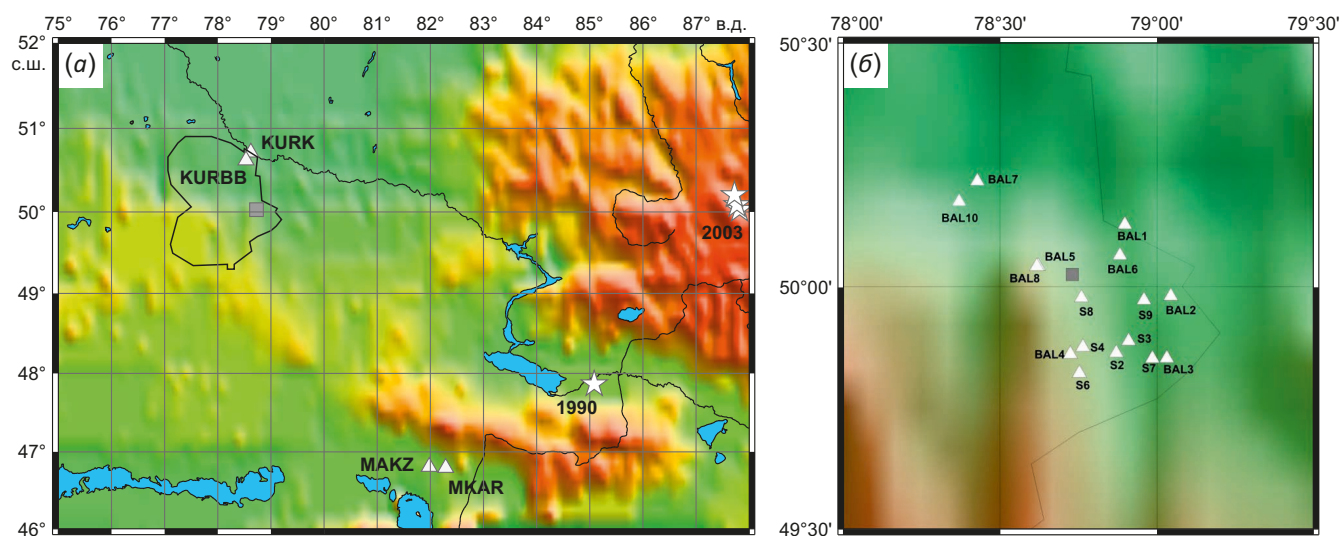


Рис. 1. Карты района исследований.

(а) – весь район. Треугольники – стационарные станции, квадрат – карьер Кара-Жыра. Показан контур СИП. Звездочки – эпицентры сильнейших землетрясений (Чуйского 27.09.2003 г. ($M_w=7.3$) и двух его самых сильных афтершоков ($M_w \geq 6.0$), а также Зайсанского 14.06.1990 г. ($M_w=6.6$)). (б) – расположение сейсмических станций на площадке Балапан. Треугольники – станции; квадрат – карьер Кара-Жыра.

Fig. 1. Maps of the investigated area.

(а) – a whole area. Triangles are permanent stations, a square is the Kara-Zhyra quarry. The contours of the Semipalatinsk test site are shown. Stars are the epicenters of the largest earthquakes (Chuya earthquake of 27.09.2003 ($M_w=7.3$) and its two strongest after-shocks ($M_w \geq 6.0$), and Zaisan earthquake of June 14, 1990 ($M_w=6.6$)). (б) – seismic stations location on the Balapan site. Triangles are stations, a square is the Kara-Zhyra quarry.

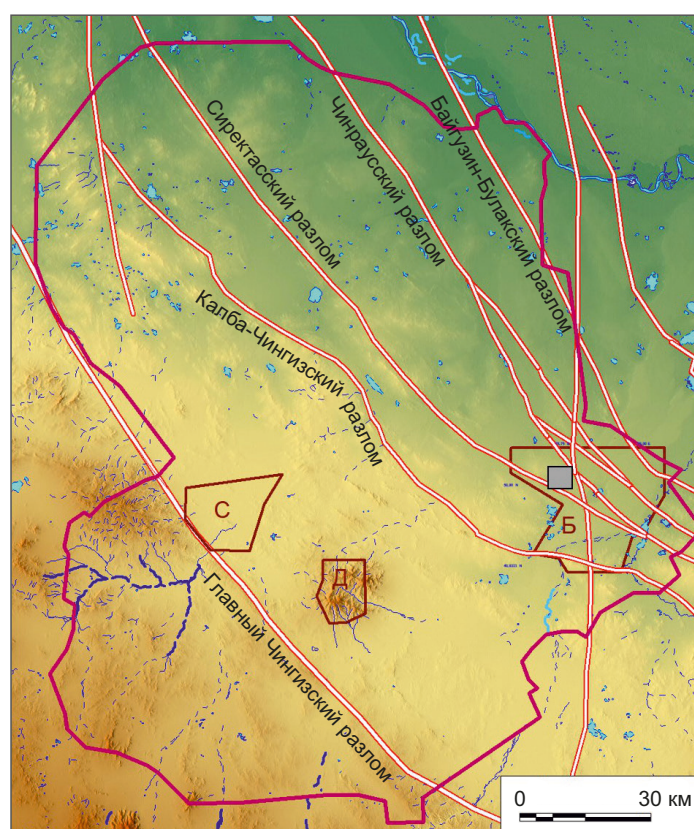


Рис. 2. Разломные зоны в области СИП. Показаны главные площадки, на которых проводились ПЯВ (С – Сары-Узень, Д – Дегелен, Б – Балапан). Квадрат – карьер Кара-Жыра.

Fig. 2. The fault zones near the Semipalatinsk test site. There are shown major sites where UNEs were conducted (С – Sary-Uzen, Д – Degelen, Б – Balapan). A square is the Kara-Zhyra quarry.

в коде затухают медленнее, чем по закону $A(t) \sim 1/t$, что в рамках принятой модели формирования коды соответствует нулевому коэффициенту поглощения. В таких случаях величина Q_s формально была принята равной 2000.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рис. 3 представлены огибающие коды, построенные по записям калибровочных (ст. S4) и карьерных взрывов (ст. BAL4, карьер Кара-Жыра). Наблюдаются существенные вариации их наклона в различных интервалах времени. Интерес представляет очень резкое

падение амплитуд в коде для станции S4 в интервале $t=23-50$ с. В данном случае и эпицентры взрывов, и станция расположены вблизи крупного регионально-го Калба-Чингизского разлома. Эффективная добротность для этого интервала равна 45. В то же время для станции BAL4 эпицентры карьерных взрывов находятся относительно далеко от этого разлома и минимальная добротность, соответствующая интервалу 34–50 с, поднимается до 60.

Рис. 4 иллюстрирует огибающие коды для ст. KURK и KURBB, расположенных на севере СИП, а также ст. MAKZ и MKAR, установленных вблизи восточной границы

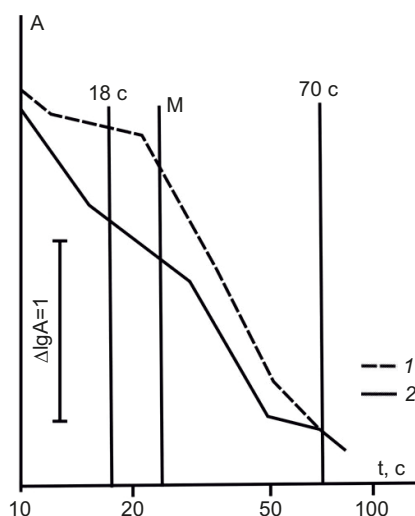


Рис. 3. Огибающие коды, построенные по записям ст. S4 (1) и BAL4 (2). М – положение границы Мохо (здесь и ниже).

Fig. 3. Coda envelopes constructed based on the records from stn. S4 (1) and BAL4 (2). M is the Moho boundary (here and below).

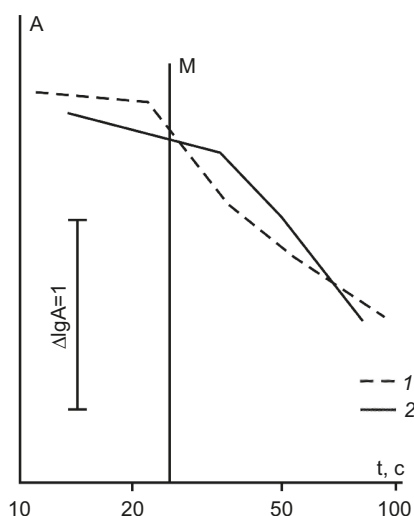


Рис. 4. Огибающие коды, построенные по записям ст. KURK и KURBB (1), а также ст. MAKZ и MKAR (2).

Fig. 4. Coda envelopes constructed based on the records from stn. KURK and KURBB (1), and stn. MAKZ and MKAR (2).

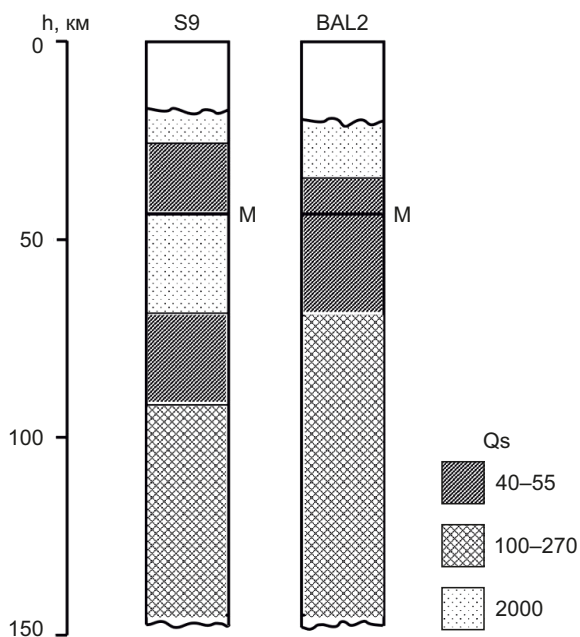


Рис. 5. Разрезы поля поглощения по данным ст. S9 и BAL2.

Fig. 5. Attenuation field sections on the data from stn. S9 and BAL2.

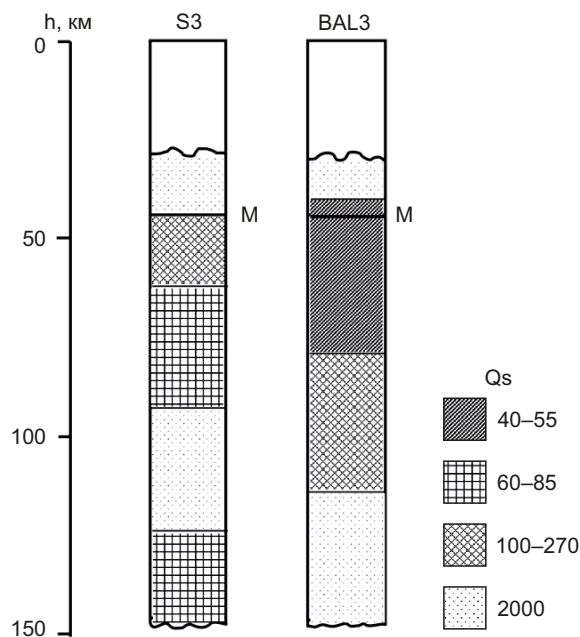


Рис. 6. Разрезы поля поглощения по данным ст. S3 и BAL3.

Fig. 6. Attenuation field sections on the data from stn. S3 and BAL3.

Республики Казахстан. Огибающие коды построены по записям близких землетрясений. В данном случае минимальные величины добротности равны соответственно 85 (в интервале 22–40 с для ст. KURK и KURBB) и 160 (в интервале 35–80 с для ст. MAKZ и MKAR).

На рис. 5, 6, 7, 8, 9, 10 представлены разрезы поля поглощения, построенные по данным временных станций в области площадки Балапан и к северу от нее. При

их построении использована простейшая двухслойная модель среды со средними скоростями S-волн в коре мощностью 44 км [Belyashova et al., 2000] и верхах мантии соответственно 3.5 и 4.6 км/с. Выделяются зоны очень высокого поглощения ($Q_s=40-55$) в нижней коре и верхах мантии (на глубинах до ~100 км) в областях ст. BAL2, BAL3, BAL8, BAL10, S4, S8 и S9. В то же время для ст. BAL4, BAL5, S3 и S6, а также ст. KURK и KURBB

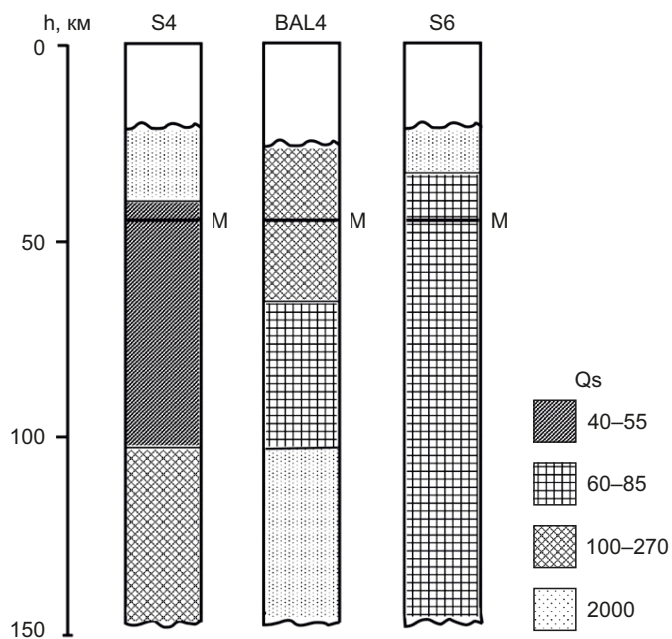


Рис. 7. Разрезы поля поглощения по данным ст. S4, BAL4, S6.
Fig. 7. Attenuation field sections on the data from stn. S4, BAL4, S6.

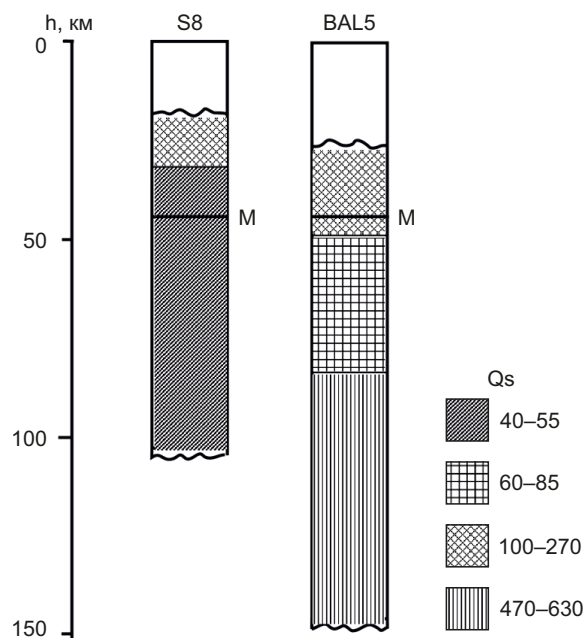


Рис. 8. Разрезы поля поглощения по данным ст. S8 и BAL5.
Fig. 8. Attenuation field sections on the data from stn. S8 and BAL5.

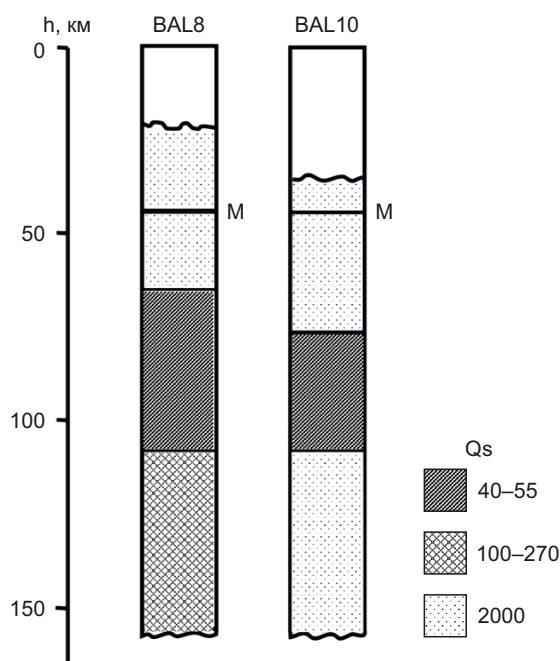


Рис. 9. Разрезы поля поглощения по данным ст. BAL8, BAL10.
Fig. 9. Attenuation field sections on the data from stn. BAL8, BAL10.

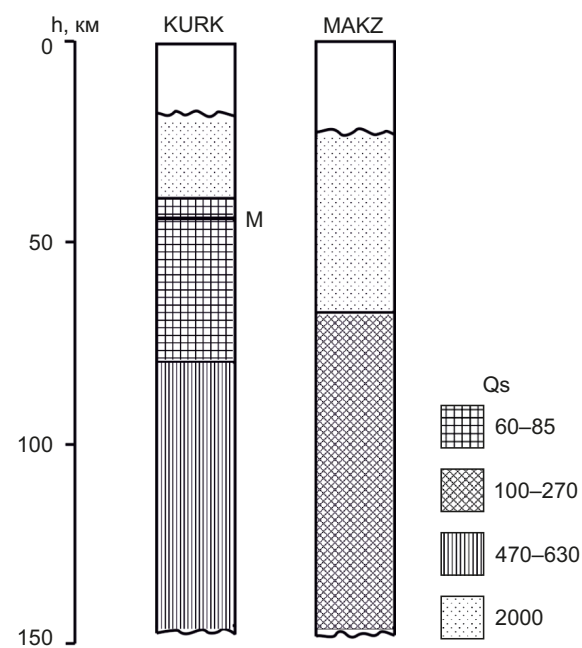


Рис. 10. Разрезы поля поглощения по данным ст. KURK и KURBB, а также MAKZ и MKAR.
Fig. 10. Attenuation field sections on the data from stn. KURK and KURBB, and stn. MAKZ and MKAR.

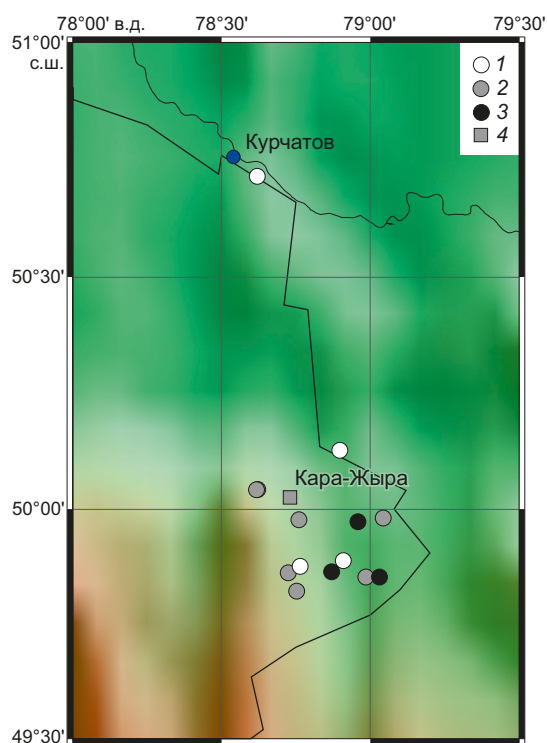


Рис. 11. Неоднородности поля поглощения в нижней коре. Поглощение: 1 – пониженное, 2 – промежуточное, 3 – повышенное, 4 – карьер Кара-Жыра.

Fig. 11. Attenuation field heterogeneities in the lower crust. Attenuation: 1 – low, 2 – intermediate, 3 – high, 4 – Kara-Zhyra quarry.

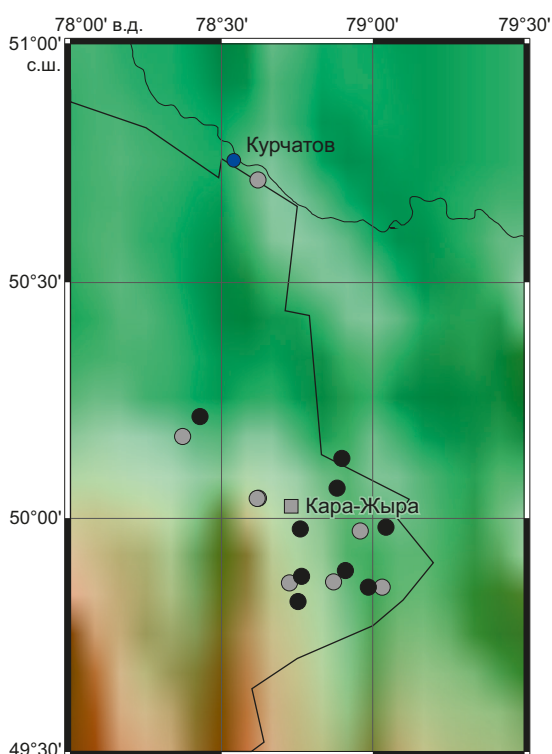


Рис. 12. Неоднородности поля поглощения в верхних мантии. Обозначения – на рис. 11.

Fig. 12. Attenuation field heterogeneities in the uppermost mantle. See legend in Fig. 11.

минимальные величины Q_s находятся в диапазоне 60–85 (рис. 10). Для ст. MAKZ и MKAR относительно низкие значения Q_s (~160) соответствуют диапазону глубин ~65–150 км (рис. 10). Эти две станции находятся на сравнительно небольшом расстоянии от очага сильно-го Зайсанского землетрясения 1990 г. ($M_w=6.6$).

Рис. 11 и 12 показывают неоднородности поля поглощения в нижней коре (на глубинах 25–44 км) и верхах мантии ($h=44$ –80 км). Видно, что в нижней коре в целом повышенное поглощение наблюдается в юго-восточной части площадки Балапан ($Q_s=45$ –70). В то же время в остальной части площадки, а также в области ст. KURK и KURBB преобладает пониженное и промежуточное поглощение.

Из рис. 12 следует, что в верхах мантии очень высокое поглощение соответствует восточной части площадки Балапан. Здесь (а также в области ст. KURK и KURBB) величины Q_s не поднимаются выше 230.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, скорости сейсмических волн в литосфере слабосейсмичных районов, к которым относится и территория СИП, как правило, выше, а поглощение слабее, чем в сейсмически активных районах [Kopnichen, Arakelyan, 1988; Bakirov, 2006; Roecker et al., 1993; Belyashova et al., 2000]. В то же время полученные данные свидетельствуют о том, что минимальная добротность для целого ряда станций в районе СИП (40–55) значительно ниже, чем в районе Северного Тянь-Шаня (~60–80) [Kopnichen, Sokolova, 2019], где зарегистрированы землетрясения с $M \sim 8$ в конце XIX и начале XX в. [New Catalog..., 1977].

Повышенное поглощение поперечных волн соответствует присутствию флюидов в области распространения. Имеющиеся данные, полученные методом МТЗ [Van'yan, Hyndman, 1996], говорят о том, что наиболее высокая проводимость, так же как и сильное поглощение S-волн, наблюдается в нижней коре и верхах мантии. В районе площадки Балапан проходят два крупных разлома – Калба-Чингизский и Чинрауский. Можно полагать, что постоянная вибрация, связанная с воздушными и подземными ядерными взрывами, проводившимися с конца 1940-х до 1989 г., а также с карьерными взрывами с начала 2000-х гг., облегчала миграцию глубинных флюидов по разломным зонам [Kopnichen, 1998; Kopnichen, Sokolova, 2001]. Такой эффект наблюдался в районе Северного Тянь-Шаня даже после относительно слабых (по сравнению с ПЯВ на СИП) химических взрывов [Kopnichen, 1998]. После подъема флюидов в нижнюю кору возможна их дальнейшая миграция как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, что позволяет объяснить особенности пространственной структуры поля поглощения в области площадки Балапан.

Следует заметить, что высокое поглощение в нижней коре и верхах мантии часто наблюдается перед сильными землетрясениями в разных районах земного шара [Kopnichen et al., 2009]. В этой связи, по мнению ав-

торов, целесообразно активизировать анализ различных геофизических и геохимических данных в районе СИП в целях возможного среднесрочного прогноза сильного сейсмического события. Полученные данные можно использовать для оценки сейсмической опасности территории, а также для выбора мест установки новых сейсмических станций с целью мониторинга сейсмических событий различной природы. Кроме того, данные о поглощении S-волн могут быть использованы для моделирования конфигурации и выбора параметров системы раннего предупреждения о сильных землетрясениях для атомных объектов Восточного Казахстана [Nakamura et al., 2009].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Восточного Казахстана. Сконструированы общие огибающие коды S-волн по записям близких калибровочных и карьерных взрывов, а также местных землетрясений, полученным стационарными и временными станциями. По этим данным построены разрезы поля поглощения в литосфере рассматриваемого района. Проведено картирование неоднородностей поля поглощения в нижней коре и верхах мантии Восточного Казахстана. Полученные данные могут быть использованы для выделения зон с высоким содержанием флюидов в литосфере, в которых возможна подготовка сильных землетрясений.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.Е. Великанову, ведущему геофизику ИГИ НЯЦ РК, за помощь в подготовке рис. 2.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aptikaeva O.I., Kopnichen Yu.F., 1993. Space-Time Variations of the Coda Wave Envelopes of Local Earthquakes in the Region of Central Asia. *Journal of Earthquake Prediction Research* 2 (4), 497–514.

Bakirov A.B. (Ed.), 2006. The Earth's Crust and Upper Mantle of the Tien Shan in Connection with Geodynamics and Seismicity. Ilim, Bishkek, 116 p. (in Russian) [Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой

и сейсмичностью / Ред. А.Б. Бакиров. Бишкек: Илим, 2006. 116 с.].

Belyashova N.N., Shatsilov V.I., Mikhailova N.N., Komarov I.I., Sinyova Z.I., Belyashov A.V., Malakhova M.N., 2000. Using Calibration Explosions at Semipalatinsk Test Site for Adjustment of Velocity Cross-Section of Earth Crust and Upper Mantle. *NNC RK Bulletin. Geophysics and Non-Proliferation Problems* 2, 45–52 (in Russian) [Беляшова Н.Н., Шацлов В.И., Михайлова Н.Н., Комаров И.И., Синева З.И., Беляшов А.В., Малахова М.Н. Использование калибровочных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне для уточнения скоростного разреза земной коры и верхней мантии // Вестник НЯЦ РК: Геофизика и проблемы нераспространения. 2000. Вып. 2. С. 45–52].

Kopnichen Yu.F., 1985. Short Period Seismic Wavefields. *Nauka, Moscow*, 176 p. (in Russian) [Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985. 176 с.].

Kopnichen Yu.F., 1998. Influence of Powerful Explosions on the Structure of the Transverse Wave Absorption Field in the Earth's Crust and Upper Mantle. *Doklady Earth Sciences* 363A (9), 1315–1318.

Kopnichen Yu.F., Arakelyan A.R., 1988. Nature of Short Period Seismic Fields up to Distances of 3000 km. *Volcanology and Seismology* 4, 77–92 (in Russian) [Копничев Ю.Ф., Аракелян А.Р. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 77–92].

Kopnichen Yu.F., Gordienko D.D., Sokolova I.N., 2009. Space-Time Variations of the Shear Wave Attenuation Field in the Upper Mantle of Seismic and Low Seismicity Areas. *Journal of Volcanology and Seismology* 3, 44–58. <https://doi.org/10.1134/S0742046309010059>.

Kopnichen 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.

Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N., 2012. Heterogeneities of the Shear Wave Attenuation Field in the Lithosphere of East Tien Shan and Their Relationship with Seismicity. *Doklady Earth Sciences* 442, 292–295. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12020249>.

Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N., 2019. Mapping S-Wave Attenuation Field in the Region of the North Tien Shan Using Seismogram Coda for Local Earthquakes and Quarry Blasts. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 55, 1803–1813. <https://doi.org/10.1134/S000143381910215>.

Molnar P., Oliver J., 1969. Lateral Variations of Attenuation in the Upper Mantle and Discontinuities in the Lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 74 (10), 2648–2682. <https://doi.org/10.1029/JB074i010p02648>.

Nakamura H., Horiuchi S., Wu C., Yamamoto S., Rydelek P., 2009. Evaluation of the Real-Time Earthquake Information System in Japan. *Geophysical Research Letters* 36 (B5), L00B01. <https://doi.org/10.1029/2008GL036470>.

New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times to 1975, 1977. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.].

Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L., 1993. Three-

Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien Shan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 98 (B9), 15779–15795. <https://doi.org/10.1029/93JB01560>.

Van'yan L.L., Hyndman R.D., 1996. Nature of Electrical Conductivity of the Earth's Crust. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 32 (4), 261–267.