

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-17-22>
УДК 550.344

КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНАХ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА И ЗАПАДНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МАКАНЧИ

Ю.Ф. Копничев¹⁾, И.Н. Соколова²⁾

¹⁾ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²⁾ Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: sokolova@kndc.kz

Анализируются записи местных землетрясений из районов восточного Казахстана и Западного Алтая, полученные станциями МАКЗ и МКАР. Рассматривается корреляционная зависимость отношения максимальных амплитуд волн Sn и Pn (параметра Sn/Pn) от расстояния. На основе данной зависимости проводится картирование поля поглощения S-волн в литосфере рассматриваемого района. Особое внимание уделяется зонам высокого поглощения в литосфере, проводится их сопоставление с сейсмичностью. Установлено, что наиболее высокое поглощение соответствует очаговой зоне сильнейшего Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. ($M_w=7,3$). Кроме того, выделена аномалия высокого поглощения в районе Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и к югу от него. Обсуждаются причины высокого поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений, а также на некоторых участках СИП.

Ключевые слова: литосфера; поглощение; S-волны; восточный Казахстан; Западный Алтай; глубинные флюиды.

ВВЕДЕНИЕ

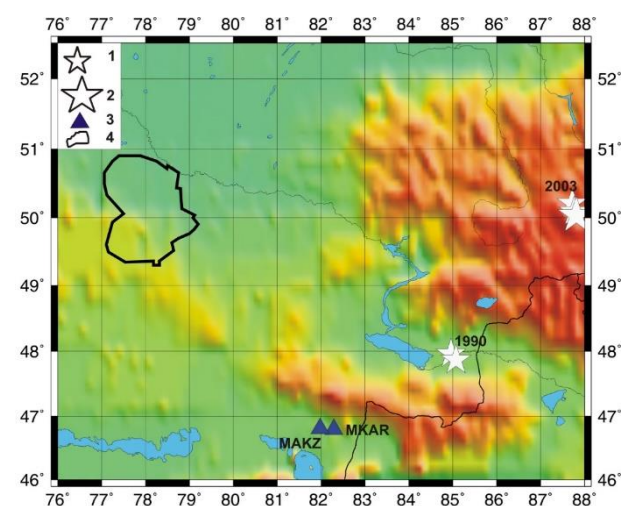
В последние 20 лет разными авторами получено большое количество данных, свидетельствующих о важной роли глубинных флюидов в процессах подготовки сильных коровых землетрясений. Перед такими событиями формируются зоны высокого содержания флюидов в нижней коре и верхах мантии [1–7]. При этом в случае, если флюиды образуют связную сеть, заполняющую поры и трещины, на кровле двухфазного слоя имеет место концентрация напряжений [8], что при достаточной мощности такого слоя может служить триггером, обеспечивающим реализацию сильного землетрясения. В связи с этим выделение зон повышенного содержания флюидов может быть полезным для прогноза областей подготовки сильных сейсмических событий [9]. В свою очередь, было показано, что перспективные методы выделения таких областей связаны с картированием поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере [3–9]. В настоящей статье описываются результаты изучения характеристик поля поглощения поперечных волн в районе восточного Казахстана и Западного Алтая.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе анализировались записи землетрясений на региональных расстояниях, полученные сейсмическими станциями сети мониторинга Института геофизических исследований (ИГИ) НЯЦ РК МКАР и МАКЗ [10] (рисунок 1). Широкополосная трехкомпонентная станция МАКЗ глобальной сети станций IRIS GSN находится в Урджарском районе Восточно-Казахстанской области в 3 км к северо-западу от поселка Маканчи (начало работы в 1996 г.). Первичная сейсмическая группа международной системы мониторинга МКАР установлена в 1999 г. в Урджарском

районе Восточно-Казахстанской области в 25 км к востоку от поселка Маканчи. Сейсмическая группа Маканчи состоит из 10 точек наблюдения, на одной из них (МК31) установлен широкополосный трехкомпонентный сейсмометр, данные которого использовались для обработки [10]. На рисунке 1 показаны эпицентры сильных землетрясений (Зайсанского, 14.06.1990 г. $M=6,6$ и Чуйского, 27.09.2003 г.), а также их сильнейших афтершоков.

В общей сложности обработаны записи около 120 землетрясений с магнитудами 4,0–5,5, полученные в 1997–2021 гг. в диапазоне эпицентральных расстояний 210–625 км.



Эпицентры сильных землетрясений: 1 – $M=6,0-6,9$; 2 – $M_w=7,3$;
3 – станции МАКЗ и МКАР;
4 – Семипалатинский испытательный полигон (СИП)

Рисунок 1. Карта района исследований

МЕТОДИКА

При анализе сейсмограмм, полученных станциями MKAR и MAKZ, мы использовали отношения максимальных амплитуд волн Sn и Pn (параметр $\lg A_{Sn}/A_{Pn}$, который мы для краткости будем обозначать как Sn/Pn) [3–7]. Эти волновые группы распространяются в верхней мантии; при использовании записей одной станции параметр Sn/Pn служит мерой поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере в районах эпицентров рассматриваемых событий (рисунок 2). Параметр Sn/Pn используется для нормировки, поскольку волны Sn и Pn распространяются близкими трассами. При этом длина отрезков трасс, проходимых волнами Sn в нижней коре, составляет несколько десятков км и почти не зависит от Δ , поэтому изменение параметра Sn/Pn с расстоянием происходит в основном вследствие вариаций поглощения в верхах мантии.

При обработке сейсмограмм применялась узкополосная частотная фильтрация, которая позволяет исключить из анализа эффекты, связанные с различием спектров очагового излучения для разных событий, зависимостью эффективной добротности от частоты

и т.д. Использовался фильтр с центральной частотой 1,25 Гц и шириной 2/3 октавы, аналогичный соответствующему ЧИСС-каналу [11].

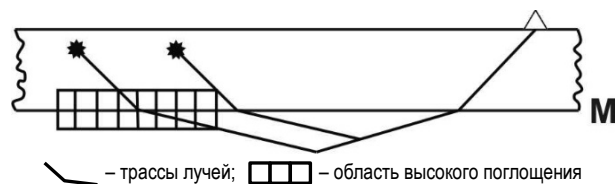
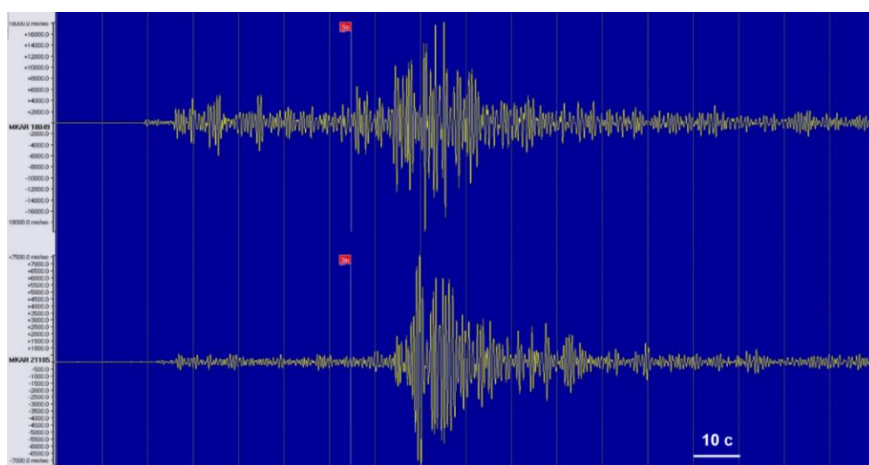


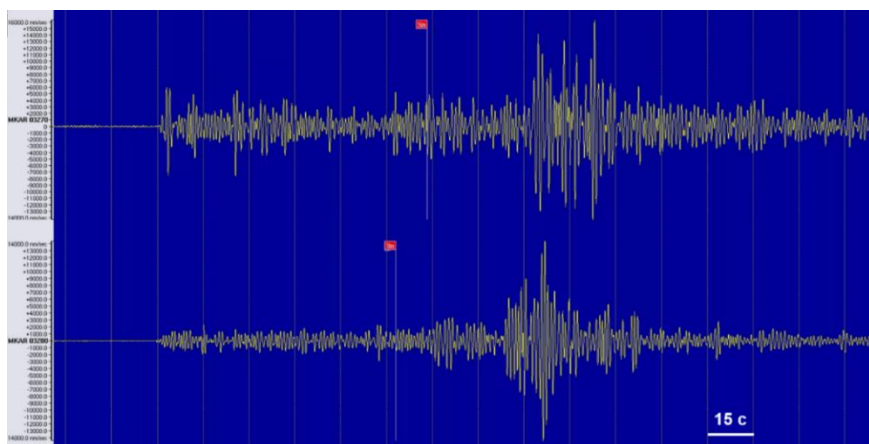
Рисунок 2. Схема распространения волн Sn

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рисунке 3 представлены примеры сейсмограмм землетрясений из рассматриваемого района. Из рисунка 3а следует, что величина Sn/Pn гораздо ниже для события вблизи от площадки Балапан, чем для землетрясения с эпицентром к юго-западу от данной площадки. Рисунок 3б показывает, что относительный уровень волны Sn гораздо ниже для афтершока сильнейшего Чуйского землетрясения 2003 г. по сравнению с событием к западу от очага сильного землетрясения.



а) 18.02.2018 г., 48,25°, 77,49°, h=10 км, Δ=395 км (верхняя сейсмограмма).
15.04.2021 г., 49,66°, 78,49°, h=10 км, Δ=425 км. Показаны моменты вступления волн Sn.



б) 27.09.2003 г., 50,43°, 87,69°, h=10 км, Δ=568 км (верхняя сейсмограмма),
07.10.2003 г., 50,14°, 86,91°, h=10 км, Δ=505 км

Рисунок 3. Примеры сейсмограмм из районов восточного Казахстана и Западного Алтая. Станция MKAR.

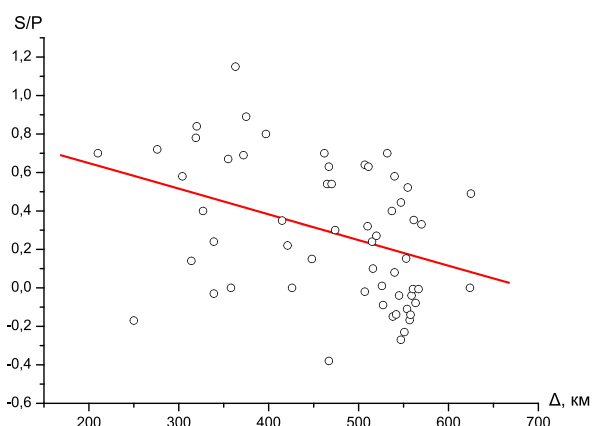


Рисунок 4. Зависимость $S_n/P_n(\Delta)$ для рассматриваемого района

Рисунок 4 иллюстрирует зависимость параметра S_n/P_n от расстояния для рассматриваемого района. Подавляющее большинство точек на графике соответствует средним значениям, полученным для близких землетрясений в небольших областях размером до нескольких десятков километров. На фоне большого разброса данных величина S_n/P_n довольно быстро падает с расстоянием, корреляционная зависимость описывается выражением:

$$S_n/P_n \sim 0,92 - 0,00135 \Delta,$$

коэффициент корреляции $r = 0,38$.

Картирование поля поглощения проводилось по отклонениям параметра S_n/P_n от корреляционной зависимости. Отклонениям $\Delta S_n/P_n > 0,15$ соответствует пониженное, $0,15 \geq \Delta S_n/P_n \geq -0,15$ – промежуточное и $\Delta S_n/P_n < -0,15$ – повышенное поглощение.

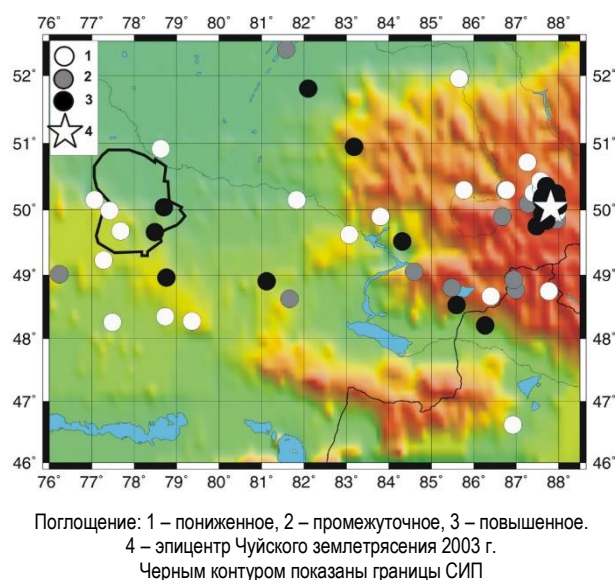


Рисунок 5. Неоднородности поля поглощения S-волн в литосфере восточного Казахстана и Западного Алтая

На рисунке 5 показаны неоднородности поля поглощения в рассматриваемом районе. Прослежи-

вается аномалия высокого поглощения в очаговой зоне сильного Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7,3$). Выделяется также полоса повышенного и промежуточного поглощения, протягивающаяся в северо-западном направлении вдоль границы юго-западного Алтая. Кроме того, на фоне в целом сравнительно слабого поглощения в районе Казахской платформы выделяется небольшая область низких величин S_n/P_n на юго-востоке СИП и к югу от него.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рисунка 5 следует, что наиболее яркая аномалия высокого поглощения в рассматриваемом районе связана с очаговой зоной сильнейшего Чуйского землетрясения 2003 г. ($M_w=7,3$). Это согласуется с полученными ранее данными о концентрации флюидов в литосфере перед сильными коровыми землетрясениями [1–7, 9]. Дальнейшее накопление данных, возможно, позволит выделить в рассматриваемом районе другие области высокого поглощения, которые могут быть связаны с подготовкой сильных сейсмических событий.

В районе Казахской платформы, к северу от оз. Балхаш, наблюдается в основном пониженное поглощение, что не противоречит имеющимся данным о характеристиках литосферы слабосейсмичных структур [12]. В то же время в области площадки Балапан и к югу от нее (на расстояниях до 100 км) выделяется субмеридиональная полоса высокого поглощения. Это согласуется с приведенными в работе [13] данными об аномалиях поглощения S-волн в области этой площадки, полученными по записям калибровочных взрывов.

Отметим, что до начала ядерных испытаний район СИП ничем не выделялся среди других сходных по тектоническим условиям Казахской платформы (в частности, отсутствует какая-либо информация о местных землетрясениях в районе полигона до 1976 г.). Учитывая этот факт, а также существование яркой тепловой аномалии в данном районе [14], естественно предположить, что изменения структуры поля поглощения есть результат длительного интенсивного воздействия мощных взрывов на геологическую среду.

По нашему мнению, единственная возможная интерпретация обнаруженных эффектов связана с подъемом флюидов из нижней части земной коры и верхов мантии. Ранее было показано, что в районе Северного Тянь-Шаня активная миграция флюидов по зоне Заилийского разлома наблюдалась после сравнительно слабых химических взрывов (мощностью до нескольких килотонн [15]). Тем более этого можно ожидать для района СИП, где в течение 40 лет проводилось в среднем за год более 10 ядерных взрывов, мощность многих из которых превышала 100 кт [16].

Характерно, что подъем флюидов наиболее ярко проявился в области площадки Балапан, где проходят два крупных разлома, проникающих в верхнюю

мантию [13]. Как известно, зоны глубинных разломов, содержащих заметную долю флюидов, являются, по терминологии Пригожина [17], диссипативными структурами, которым, свойственна, в частности, высокая чувствительность к внешним воздействиям. Под действием сейсмических колебаний при мощных взрывах происходит раскрытие пор и трещин различного масштаба, что облегчает подъем флюидов из нижней коры и верхней мантии по разломным зонам. (Известно, что при импульсном акустическом воздействии на фильтрующую среду ее проницаемость может возрасти на несколько порядков [18]). Полученные в работе [13] данные о тонкой структуре поля поглощения в районе СИП свидетельствуют о том, что миграция флюидов может происходить с глубиной порядка 100 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработаны записи местных землетрясений из районов восточного Казахстана и Западного Алтая, полученные станциями МАКЗ и МКАР. Построена корреляционная зависимость параметра S_n/P_n от расстояния. На основе данной зависимости проведено картирование поля поглощения S-волн в литосфере рассматриваемого района. Установлено, что наиболее высокое поглощение соответствует очаговой зоне сильнейшего Чуйского землетрясения 2003 г. Кроме того, выделена аномалия высокого поглощения в районе СИП и к югу от полигона. Полученные данные свидетельствуют о миграции глубинных флюидов перед сильными землетрясениями, а также в результате длительного интенсивного техногенного воздействия на земную кору при крупной серии мощных ядерных взрывов.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).

ЛИТЕРАТУРА

- Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // *Geology*. – 2001. – V. 29. – No. 9. – P. 847–850.
- Ogawa, R. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion / R. Ogawa, K. Heki // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. L06313. <https://doi.org/10.1029/2007GL029340>
- 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.
- Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н.Соколова // *Докл. РАН*. – 2011. – Т. 437. – № 1. – С. 97–101.
- 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.
- Копничев, Ю.Ф. Аномалии высокого поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в литосфере Алтая: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2016. – Т. 15. – № 1. – С. 57–72.
- 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.
- Каракин, А.В. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы / А.В. Каракин, Л.И. Лобковский // *ДАН СССР*. – 1982. – Т. 268. – № 2. – С. 324–329.
- Копничев, Ю.Ф., Анализ кольцевых структур сейсмичности в литосфере Восточного Тянь-Шаня: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н.Соколова // *Вестник АО «КазНИИАС»*. – 2017. – № 1. – С. 16–31.
- Mikhailova, N.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan / N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova // *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre 2016 January-June*. – 2019. – Vol. 53. – Issue 1. – P. 27–38.
- Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля /Ю.Ф. Копничев //М.: Наука. 1985. 176 с.
- Ваньян, Л.Л., О природе электропроводности консолидированной коры / Л.Л. Ваньян, Р.Д. Хайндман // *Физика Земли*. – 1996. – № 4. – С. 5–11.
- 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.
- Sultangazin, U.M. Monitoring of temperature anomalies in the former Semipalatinsk test site / U.M. Sultangazin, E.A. Zakarin, L.F. Spivak et al. // *Ser. Method. Instrum. Acad. Sci. Paris*. – 1998. – V. 326. – P. 135–140.
- Копничев, Ю.Ф. О воздействии мощных взрывов на структуру поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхах мантии / Ю.Ф. Копничев // *Докл. РАН*. – 1998. – Т. 363. – № 1. – С. 819–822.
- Михайлов, В.Н. (ред.). Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР, 1949–1990 гг. / В.Н. Михайлов // *РФЯЦ-ВНИИЭФ*. – Саров. – 1996. – 66 с.
- Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур – к упорядоченности через флуктуации. / Г. Николис, И. Пригожин // М.: Мир. – 1979. – 512 с.
- Барабанов, В.Л. О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений / В.Л. Барабанов, А.О. Гриневский, И.Г. Киссин, А.В. Николаев // *Докл. АН СССР*. – 1987. – Т. 297. – № 1. – С. 53–56.

REFERENCES

1. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile /S. Husen, E. Kissling // *Geology*. – 2001. – V. 29. – No. 9. – P. 847–850.
2. Ogawa, R. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion / R. Ogawa, K. Heki // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. L06313. <https://doi.org/10.1029/2007GL029340>
3. Kopnichev, Yu.F. Prostranstvenno-vremennye variatsii polya pogloshcheniya S-voln v ochagovykh zonakh sil'nykh zemletryaseniy Tyan'-Shanya / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Fizika Zemli*. – 2003. – No. 7. – P. 35–47.
4. Kopnichev, Yu.F. Neodnorodnosti polya pogloshcheniya korotkoperiodnykh poperechnykh voln v litosfere Tsentral'noy Azii i ikh svyaz' s seysmichnost'yu / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Dokl. RAN*. – 2011. – T. 437. – No. 1. – P. 97–101.
5. Kopnichev, Yu.F. Neodnorodnosti polya pogloshcheniya korotkoperiodnykh poperechnykh voln v litosfere Vostochnogo Tyan'-Shanya i ikh svyaz' s seysmichnost'yu / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Dokl. RAN*. – 2012. – T. 442. – No. 6. – P. 821–824.
6. Kopnichev, Yu.F. Anomalii vysokogo pogloshcheniya S-voln i kol'tsevye struktury seysmichnosti v litosfere Altaya: vozmozhnaya podgotovka sil'nykh zemletryaseniy / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. – 2016. – T. 15. – No. 1. – P. 57–72.
7. Kopnichev, Yu.F. Prostranstvenno-vremennye variatsii polya pogloshcheniya poperechnykh voln v verkhney mantii seysmicheskii aktivnykh i slaboseysmichnykh rayonov / Yu.F. Kopnichev, D.D. Gordienko, I.N. Sokolova // *Vulkanologiya i seysmologiya*. – 2009. – No. 1. P. 49–64.
8. Karakin, A.V. Gidrodinamika i struktura dvukhfaznoy astenosfery / A.V. Karakin, L.I. Lobkovskiy // *DAN SSSR*. – 1982. – T. 268. – No. 2. – P. 324–329.
9. Kopnichev, Yu.F., Analiz kol'tsevykh struktur seysmichnosti v litosfere Vostochnogo Tyan'-Shanya: vozmozhnaya podgotovka sil'nykh zemletryaseniy / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Vestnik AO «KazNIISA»*. – 2017. – No. 1. – P. 16–31.
10. Mikhailova, N.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan /N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova // *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre 2016 January-June*. – 2019. – Vol. 53. – Issue 1. – P. 27–38.
11. Kopnichev, Yu.F. Korotkoperiodnye seysmicheskie volnovye polya /Yu.F. Kopnichev //Moscow: Nauka. – 1985. – 176 p.
12. Van'yan, L.L., O prirode elektroprovodnosti konsolidirovannoy kory / L.L. Van'yan, R.D. Khayndman // *Fizika Zemli*. – 1996. – No. 4. – P. 5–11.
13. Kopnichev, Yu.F. Prostranstvenno-vremennye variatsii struktury polya pogloshcheniya poperechnykh voln v rayone Semipalatinskogo poligona / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Fizika Zemli*. – 2001. – No. 11. – P. 73–86.
14. Sultangazin, U.M. Monitoring of temperature anomalies in the former Semipalatinsk test site / U.M. Sultangazin, E.A. Zakarin, L.F. Spivak et al. // *Ser. Method. Instrum. Acad. Sci. Paris*. – 1998. – V. 326. – P. 135–140.
15. Kopnichev, Yu.F. O vozdeystvii moshchnykh vzryvov na strukturu polya pogloshcheniya poperechnykh voln v zemnoy kore i verkhakh mantii / Yu.F. Kopnichev // *Dokl. RAN*. – 1998. – T. 363. – No. 1. – P. 819–822.
16. Mikhaylov, V.N. (red.). Ispytaniya yadernogo oruzhiya i yadernye vzryvy v mirnykh tselyakh SSSR, 1949–1990 gg. / V.N. Mikhaylov // *RFYaTs-VNIEF*. – Sarov. – 1996. – 66 p.
17. Nikolis, G. Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh. Ot dissipativnykh struktur – k uporyadochennosti cherez fluktuatsii. / G. Nikolis, I. Prigozhin // *Moscow: Mir*. – 1979. – 512 p.
18. Barabanov, V.L. O nekotorykh effektakh vibratsionnogo seysmicheskogo vozdeystviya na vodonasyschennuyu sredu. Sopostavlenie ikh s effektami udalennykh sil'nykh zemletryaseniy / V.L. Barabanov, A.O. Grinevskiy, I.G. Kissin, A.V. Nikolaev // *Dokl. AN SSSR*. – 1987. – T. 297. – No. 1. – P. 53–56.

МКАР СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯСЫНЫҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША
ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ЖӘНЕ БАТЫС АЛТАЙ АУДАНДАРЫНДАҒЫ
S-ТОЛҚЫНДАРДЫ СІҒІРУ ӨРІСІН КАРТАҒА ТҮСІРУ

Ю.Ф. Копничев¹⁾, И.Н. Соколова²⁾

¹⁾ *Ресей Ғылым Академиясының Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Қурчатөв, Қазақстан*

МАКЗ және МКАР станциялары алған Шығыс Қазақстан және Батыс Алтай аудандарындағы жергілікті жерсілкінулерінің жазбалары талданады. Sn және Pn (Sn/Pn параметрі) толқындарының максималды амплитудасы қатынасының қашықтыққа корреляциялық тәуелділігі қарастырылады. Осы тәуелділіктің негізінде қарастырылып отырған ауданның литосферасындағы S-толқындарының сіңіру өрісі картаға түсіріледі. Литосферадағы жоғары сіңіру аймақтарына ерекше назар аударылады, олар сейсмикалықпен салыстырылады. Ең жоғары сіңіру 2003 жылғы ең күшті Шу жерсілкінулерінің ошақтық аймағына сәйкес келетіні анықталды (Mw=7,3). Бұдан басқа, Семей сынақ полигоны (ССП) ауданында және одан оңтүстікке қарай жоғары сіңіру аномалиясы айқындалды. Қатты жерсілкінулерінің ошақтық аймақтарында, сондай-ақ ССП кейбір учаскелерінде көлденең толқындардың жоғары сіңу себептері талқыланады.

Түйінді сөздер: литосфера, S-толқындарының сіңіру, Шығыс Қазақстан, Батыс Алтай.