

УДК 550.34.064

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РМСС ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Дубровин В. И., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований. Курчатов, Казахстан

В докладе отражен анализ зарегистрированных сигналов от двух сильнейших землетрясений – глубокого и корового с эпицентрами в одном регионе на территории Центральной Азии, произошедших в 2015 году с магнитудами $M_w=7,5$ и $M_w=7,2$. Результат исследования позволит расширить представление о взаимодействии фронта сейсмических волн с неоднородностями геологической среды, расположенными на пути распространения различных волн.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе проводится анализ зарегистрированных сигналов от двух сильнейших землетрясений на территории Центральной Азии, произошедших в 2015 году. Особенный интерес представляет собой изучение характеристик сейсмической коды при помощи обработки записей сейсмических групп с оценками направления прихода волн, частотного состава, кажущейся скорости пробега когерентных волн, проходящих через территорию группы. Впервые для анализа было выбрано катастрофическое землетрясение с магнитудой 7,5, очаг которого находился на глубине более 200 км. До этого рассматривались только коровые события Центральной Азии. Для сравнения проведен анализ с расположенным в том же районе землетрясением с очагом в земной коре, магнитуда которого составила 7,2. Поскольку эти события очень сильные, то мы имеем возможность изучить их записи по всем сейсмическим группам Казахстана, а также дополнительно привлечь к анализу записи российской сейсмической группы. Результат исследования позволит расширить представление о взаимодействии фронта сейсмических волн с неоднородностями геологической среды, расположенными на пути их распространения.

Метод РМСС

Для анализа был выбран метод РМСС – прогрессивный многоканальный корреляционный метод, разработанный во французском национальном центре данных и предоставленный казахстанскому центру данных для использования при работе с инфразвуковыми и сейсмическими данными [1].

Главное достоинство метода заключается в его способности посредством поиска взаимной корреляции между записями отдельных элементов инфразвуковой или сейсмической групп выделять сигналы, регистрируемые не одним, а несколькими элементами этих групп, оценивать азимут на источник и кажущуюся скорость. Кроме того, метод позволяет детектировать сигналы от постоянно действующих источников.

Использование метода РМСС для анализа сейсмических записей новых групп, открытых в Казах-

стане в последнее десятилетие, позволило получить интересные, ранее не известные результаты. Так, еще в 2003 году после происшедшего сильного Алтайского (Чуйского) землетрясения в пограничной области Казахстана и России с магнитудой 7,3 по записям групп Боровое и Каратау было замечено, что спустя некоторое время от начала записи, когда начинает регистрироваться кода Lg-волн, закономерно происходит изменение азимута на источник, определяемый с помощью РМСС [1].

Проявление этого эффекта имело специфические особенности: направление отклонения расчетного по РМСС азимута от истинного значения зависело от станции наблюдения. Впервые было высказано предположение о наличии масштабной глубинной неоднородности в Центральном Казахстане, влияющей на распространение волн в коде Lg.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В настоящей работе рассматриваются события из района Центральной Азии – Таджикистан и пограничный район с Афганистаном. Намеренно взяты два сильнейших землетрясения, произошедших на разных глубинах в близкое друг от друга время в 2015 году и в одном регионе.

Первое землетрясение произошло в уникальной зоне глубокофокусной сейсмичности в районе Гиндукуша. Этот район является одним из самых высокоактивных сейсмических районов Центральной Азии. Происходящие здесь сильные землетрясения с очагами до 300 км могут ощущаться на огромных расстояниях, охватывающих практически всю Центральную Азию.

26 октября 2015 года здесь произошло сильнейшее землетрясение с $M_w=7,5$. Данные об очаге этого землетрясения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры очага глубокого Гиндукушского землетрясения

Агентство	t0	φ, N	λ, E	H, км	mb	mPV	Mw
NEIC	26.10.2015 09.09.1932	36,463	70,712	231	7,7	7,3	7,5

Второе землетрясение, взятое для анализа, произошло на Памире 7 декабря 2015 г. ($M_w=7,2$) рядом

с Сарезским озером (таджикские ученые называют его Мургабским землетрясением).

Данные об очаге этого землетрясения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры Мургабского землетрясения в Таджикистане

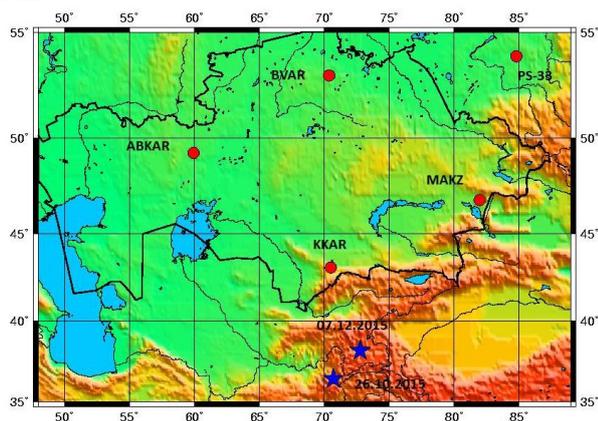
Агентство	t0	φ, N	λ, E	H, км	mPV	Mw
NEIC	07.12.2015 07.50.05	38,211	72,780	22	6,7	7,2

На рисунке 1 представлена карта расположения эпицентров двух изучаемых землетрясений. На ней же показаны пять сейсмических групп, по которым были изучены сейсмические записи этих двух событий. Это четыре казахстанские группы сейсмической сети ИГИ МЭ РК – Акбулак (ABKAR), Боровое (BVAR), Маканчи (MKAR), Каратау (KKAR), а также одна группа российской сети Залесово (PS-33).

Таблица 3. Параметры эпицентральных расстояний и баказимуты от эпицентров событий

	ABKAR		KKAR		MAKZ		BVAR		PS-33	
	Δ, км	Baz								
Глубокое	1668	144	737	178	1480	223	1841	179	2224	215
Коровое	1600	135	576	159	1215	221	1657	172	1971	212

В таблице 3 представлены эпицентральные расстояния от каждой группы до эпицентров событий, а также истинные баказимуты, то есть расчетные азимуты со станции на очаг, определенные от направления на север. По этим событиям представляется хорошая возможность сравнения характеристик волнового поля в зависимости от глубины очага, поскольку расстояния и баказимуты близки между собой.



● – сейсмические группы, ★ – очаги землетрясений

Рисунок 1. Расположение сейсмических групп и очагов исследуемых землетрясений

Из таблицы видно, что самой дальней станцией является станция Залесово, находящаяся на расстояниях 1971 км – 2224 км. А самой близкой к очагам была станция Каратау, расстояния до эпицентров

равны 737 и 576 км. Заметим, что все расстояния являются региональными, и типы сейсмических фаз на всех станциях будут одинаковы.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Задачи исследования – 1) сопоставить между собой характеристики сейсмических колебаний от двух землетрясений по одной и той же станции; 2) сопоставить между собой характеристики сейсмических записей при одном и том же событии по разным станциям сети.

Примеры записей двух событий по одной из сейсмических групп – станции Боровое – показаны на рисунках 2, 3.

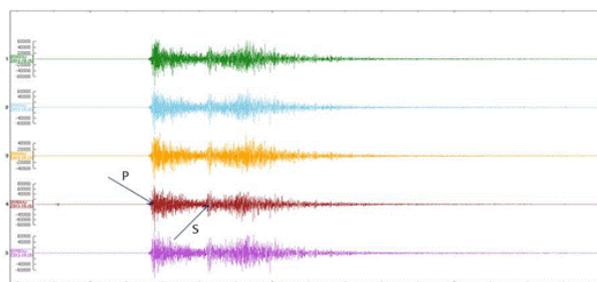


Рисунок 2. Пример записи глубокого события по станции Боровое

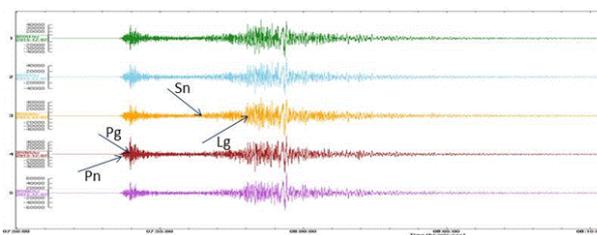


Рисунок 3. Пример записи корового события по станции Боровое

Специфическими особенностями волновой картины записей глубоких землетрясений является наличие в начальной части записи фаз, отвечающих за глубину события rP и sP, отсутствие каналовых волн Lg на региональных расстояниях. В случае глубокого гиндукушского землетрясения 26 октября 2015 г. с Mw=7.5 было выявлено, что очаг был сложным, разрыв произошел в два этапа. Сначала был более слабый толчок с Mw=5,9, а за ним через 10 секунд основной толчок с Mw=7.5. Главными фазами являются фазы P и S-волн.

При коровом землетрясении 7 декабря 2015 г. отмечается другая волновая картина. Имеют место все региональные фазы Pn, Pg, Sn, Lg.

Наш интерес был сосредоточен на анализе не основных региональных фаз, а сейсмической коды волны S у глубокого землетрясения и Lg-волны корового. Ниже рассмотрены результаты анализа по каждой сейсмической группе.

СТАНЦИЯ ЗАЛЕСОВО

Сейсмическая группа Залесово входит в Международную систему мониторинга (МСМ) организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ). Состоит из девяти сейсмических элементов. Из всех рассматриваемых групп она находится на самом дальнем расстоянии от очагов обоих землетрясений.

С помощью РМСС было проанализировано 30 минут записи землетрясений. Шкала времени показана цветом на рисунках 4, 5.

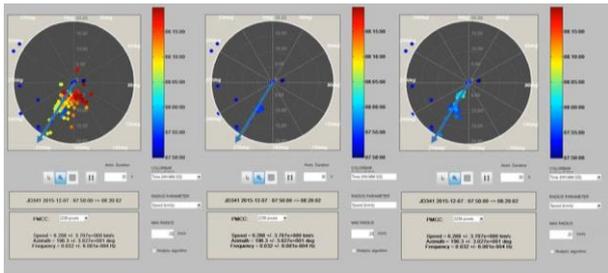


Рисунок 4. Полярные диаграммы по станции Залесово (коровое)

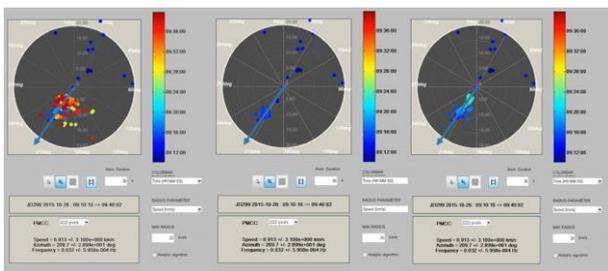


Рисунок 5. Полярные диаграммы по станции Залесово (глубокое)

На полярных диаграммах можно видеть два параметра колебаний – баказимут со станции на источник Az и кажущаяся скорость V . Синей стрелкой показано расчетное по РМСС значение баказимута.

РМСС-диаграммы представлены в виде трех фрагментов. Левый фрагмент показывает полную картину детектирований за 30 минут колебаний от момента первого вступления. Средний фрагмент – это начальная часть записи, относящаяся к первым 5 минутам, когда вступают регулярные волны. На правом фрагменте – запись примерно 12 минут. Она включает начальную часть коды.

На рисунке 4 приведены РМСС-диаграммы по коровому землетрясению 07.12.2015 г. Видна четкая дифференция разных сейсмических фаз с разной кажущейся скоростью. Азимут, рассчитанный с помощью РМСС, хорошо совпадает с истинным азимутом на источник вплоть до 20 минут записи, то есть соответствие в азимутах наблюдается для фаз P_n , P_g , L_g , поверхностных волн и начальной части коды. Лишь в дальней коде отмечается незначительный уход азимута к востоку.

Близкая картина отмечается и для глубокого землетрясения. Несмотря на то, что природа сейсмических фаз глубокого события другая, чем для корового землетрясения, распределение детектирований очень похоже. Практически весь период 30 минут азимуты детектирований соответствуют азимуту на источник. Можно отметить лишь несколько больший разброс значений у глубокого землетрясения по сравнению с коровым событием.

СТАНЦИЯ БОРОВОЕ

Для корового землетрясения (рисунок 6) наблюдается систематическая ошибка в определении баказимута по РМСС (расчетный баказимут) относительно истинного баказимута примерно на 15 градусов на запад. Она характерна как для регулярных волн, так и для близкой и далекой коды. Кроме того, наблюдается четкое семейство детектирований в баказимуте 260 градусов, характерных только для Р-волн.

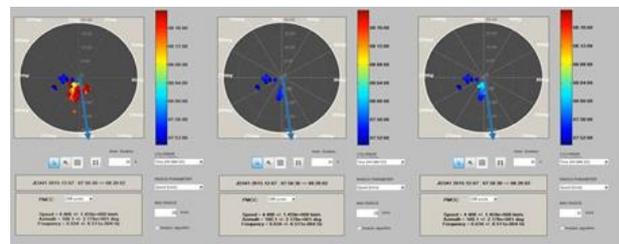


Рисунок 6. Полярные диаграммы по станции Боровое (коровое)

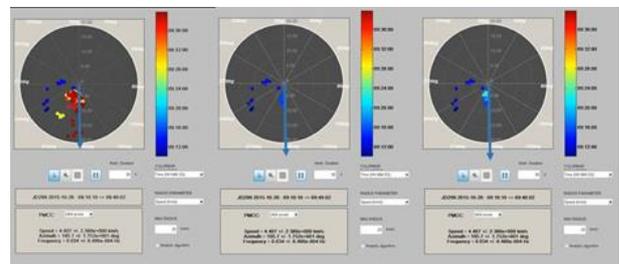


Рисунок 7. Полярные диаграммы по станции Боровое (глубокое)

Для глубокого землетрясения (рисунок 7) отклонения в баказимуте менее заметны, но наличие семейства детектирований в Р-волне с баказимутами 240–270 градусов также имеет место.

СТАНЦИЯ АКБУЛАК

Для корового (рисунок 8) землетрясения практически отсутствует ошибка в определении баказимута по РМСС. Он точно совпадает с истинным баказимутом по регулярным волнам. Отмечено семейство детектирований в начальной части записи (Р-волны) практически с обратным азимутом. Но в далекой коде L_g -волны отмечен закономерный уход расчетных азимутов от истинного на восток на 75 градусов.

Красная стрелка на рисунках указывает направление истинного баказимута.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РМСС ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

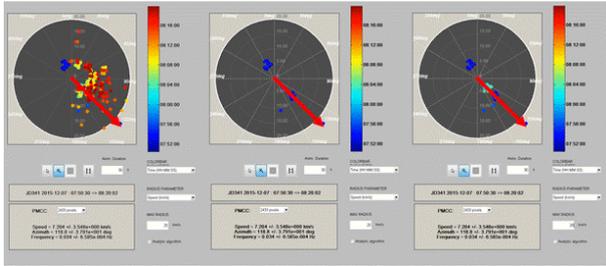


Рисунок 8. Полярные диаграммы по станции Акбулак (коровое)

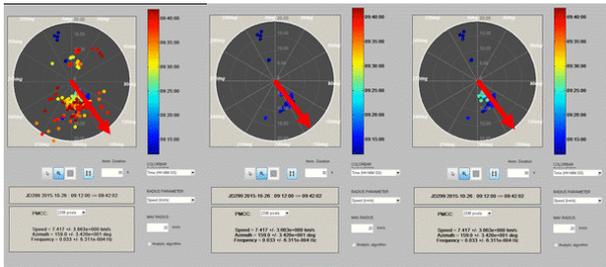


Рисунок 9. Полярные диаграммы по станции Акбулак (глубокое)

Для глубокого события (рисунок 9) в области регулярных Р и S-волн также нет никаких отклонений в баказимуте. В коде отмечен уход баказимуты в обратном направлении, чем это было для корового землетрясения примерно на такую же величину.

СТАНЦИЯ МАКАНЧИ

С самого начала записи корового землетрясения (рисунок 10) наблюдается несоответствие расчетного баказимута истинному. Красной стрелкой на рисунке 10 показано истинное направление на источник, синей – то, которое получено с использованием РМСС. Расчетный баказимут систематически больше истинного примерно на 10 градусов. Это наблюдается по волнам Pn и Pg, а также по S-волнам.

Но уже даже по регулярным волнам отмечается серия детектирований с разными кажущимися скоростями со значением баказимута примерно 200 градусов.

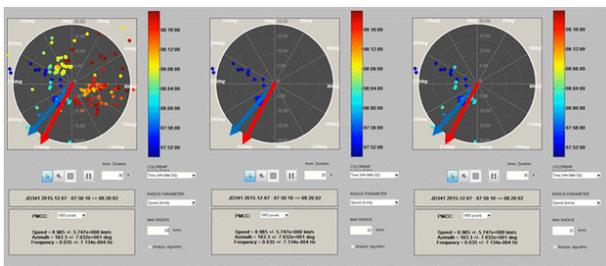


Рисунок 10. Полярные диаграммы по станции Маканчи (коровое)

При переходе к коду наблюдаются совершенно удивительные изменения в значениях азимута – волны приходят практически со всех сторон от станции.

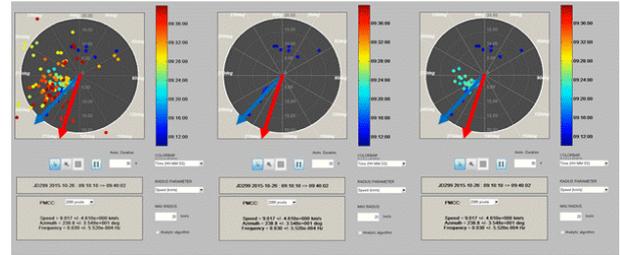


Рисунок 11. Полярные диаграммы по станции Маканчи (глубокое)

При глубоком землетрясении картина похожая (рисунок 11). С начала записи отмечены невязки в значениях баказимута в 28–30 градусов в ту же сторону, как и при коровом землетрясении. В коде все баказимуты входящих на станцию волн западнее истинного на 90–180 градусов.

СТАНЦИЯ КАРАТАУ

Это наиболее близкая к очагам землетрясений станция. При коровом землетрясении (рисунок 12) отмечена небольшая ошибка в баказимуте, которая не превышает 10 градусов. Далее с течением времени при переходе к коде Lg-волны отмечается закономерный уход азимута на восток почти на 160 градусов. Этот уход продолжается и в далекой коде, занимая весь диапазон баказимуты от 150 до 0 градусов.

При глубоком землетрясении (рисунок 13) наблюдается несколько иная картина. Отсутствуют закономерные изменения азимута во времени в коде S-волн. В течение первых 15 минут все значения баказимута по РМСС близки к истинному. Лишь в далекой коде спустя 20–30 минут от первого вступления сигналы приходят с азимуты, обратных истинному (от 300 до 30 градусов).

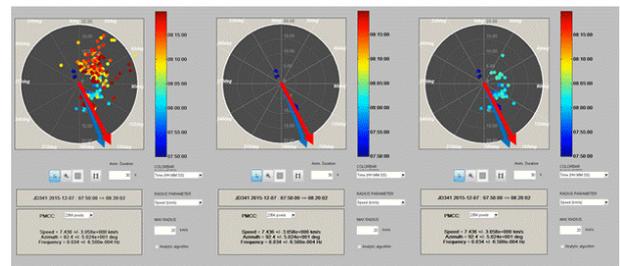


Рисунок 12. Полярные диаграммы по станции Каратау (коровое)

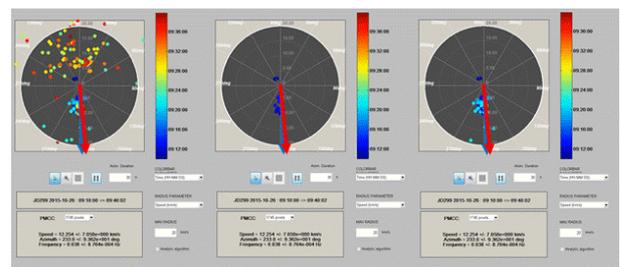


Рисунок 13. Полярные диаграммы по станции Каратау (глубокое)

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Характеристики коды, образованной рассеянными на мелких неоднородностях в литосфере волнами, как было показано ранее, зависят от взаимного расположения очага землетрясения и станции наблюдения [3]. В нашей работе этот тезис подтверждается тем, что для разных станций, расположенных в разных азимутах и на разных расстояниях от очага, получена существенно различная картина проявления характеристик коды при одном и том же землетрясении. Особенно четко это видно при сопоставлении РМСС-диаграмм самой далекой станции Залесово и самой близкой Каратау.

2. Впервые показано, что даже при близком расположении эпицентров источников, при существенно различной глубине их очагов, характеристики коды могут сильно различаться. Очень четко это наблюдается по станциям Каратау, Маканчи, Акбулак.

3. Наиболее простые записи коды наблюдаются по самой далекой станции Залесово. Как в Р-волне, так и в Sn- и Lg-коде расчетные баказимуты стабильны и совпадают с истинным баказимутом. Достаточно просты также и записи по станции Боровое, однако имеет место систематическая невязка в значениях баказимутов..

4. Существенные невязки баказимутов в Р-волнах наблюдаются по станции Маканчи, причем для глубокого землетрясения они даже существеннее, чем для корового.

5. Сложная, но различная картина в поведении баказимутов детектирования коды характерна для трех станций – Маканчи, Акбулак и Каратау. Объяснение этому может дать рассмотрение относительного расположения станций и казахстанского ороклина (рисунок 14) [4].

6. Согласно данным о геологическом строении, в Центральном Казахстане наблюдается наличие древней компактной неоднородности, которая находится между окружающими ее новейшими геологическими структурами (горные системы Урал, Алтай,

Тянь-Шань). Волны, проходящие через этот древний фундамент, должны иметь меньшее затухание, чем в окружающих горных системах. Этим процессом можно объяснить, почему самые энергетически высокие детектирования идут из казахского ороклина. Важное значение имеют и осадочные бассейны большой мощности (северо-каспийский, туранский, джунгарский), которые захватывают сейсмические волны. Именно с этими бассейнами связаны приходящие в дальней коде волны. Особенно ярко это явление наблюдается по станции Акбулак и, частично, по Маканчи.

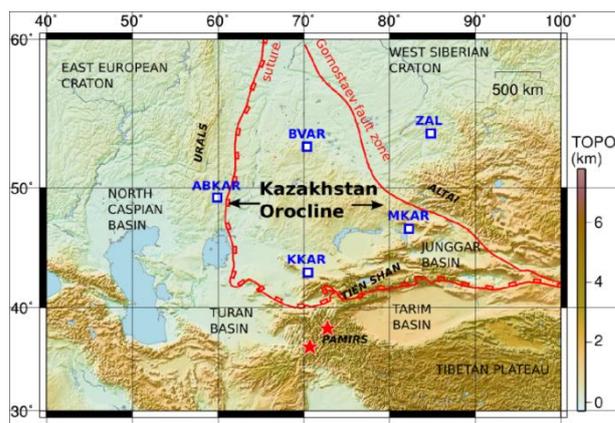


Рисунок 14. Карта Казахстана [4]. Показаны использованные станции (□), землетрясения (★), основные структуры (горные хребты, бассейны и платформы)

7. Полученные результаты показывают, что литосфера Центральной Азии, в которой происходит процесс рассеивания сейсмических волн, является горизонтально неоднородной. На коду волн значительное влияние оказывают неоднородная топография, сложная геологическая структура, распределение неоднородностей, что ведет к латеральной изменчивости характеристик скорости по простиранию, связанной с рассеянием и затуханием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cansi, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method / Y. Cansi // Geophys. Res. Lett. 1995. – 22. – P. 1021–1024.
2. Мусрепов, А.В Очаг и последствия сильнейшего гиндукушского землетрясения 26 октября 2015 г. (Mw=7,5 / А.В. Мусрепов, А.Н. Соколов // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – Вып. 4. – С. 62–70.
3. Labonne, C. Detailed Analysis of the Far-Regional Seismic Coda in Kazakhstan Using Array Processing / C. Labonne, O.Sèbe, A. Smirnov, S. Gaffet, Y. Cansi, N. Mikhailova // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 107, No. 2, pp. 611–623, April 2017, doi: 10.1785/0120160015.
4. Xiao, W., B. Huang, C. Han, S. Sun, and J. Li (2010). A review of the western part of the Altai: A key to understanding the architecture of accretionary orogens, Gondwana Res. 18, no. 2, 253–273.

**ОРТАЛЫҚ АЗИЯНЫҢ ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРІНІҢ ТОЛҚЫНДЫҚ КӨРІНІСІН ТАЛДАУ
ҮШІН ҮМК (ҮДЕМЕЛІ КӨПАРНАЛЫҚ КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ) ӘДІСТІ ҚОЛДАНУ**

В.И. Дубровин, Н.Н. Михайлова

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Баяндамада 2015 жылы Орталық Азия аумағының бір аймағында $M_w=7,5$ және $M_w=7,2$ магнитудаларымен болған екі ең қатты жерсілкінулерден – терең және қыртысты жерсілкінулерден тіркелген белгілердің талдауы көрсетілген. Зерттеу нәтижесі әртүрлі толқындардың таралу жолдарында орналасқан, геологиялық ортаның әртектіліктерімен сейсмикалық толқындар бағытының өзара әрекеттесулері туралы түсінікті кеңейтуге мүмкіндік береді.

**USING PMCC METHOD FOR THE WAVE PATTERN ANALYSIS
OF STRONG EARTHQUAKES IN CENTRAL ASIA**

V.I. Dubrovin, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The paper reflects an analysis of recorded signals from two strong earthquakes – deep one and crustal one with epicenters in one region on the territory of Central Asia, which occurred in 2015 with magnitudes $M_w=7,5$ and $M_w=7,2$. The results of this research will allow expanding the concept of interaction of seismic wave front with heterogeneity of geological environment, located on the way of various waves' propagation.