

УДК 550.34(574.4)

ОБ ОЦЕНКАХ АЗИМУТОВ И МЕДЛЕННОСТИ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ФАЗ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ PS23-МАКАНЧИ

Синева З.И.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

На примере сейсмической группы PS23-Мақанчи исследованы азимутальные отклонения и отклонения медленности для следующего набора регистрируемых региональных сейсмических фаз: первая P, Pn, Pg, P_b, первая S, Sn, Sb, Lg. Выявлены определенные закономерности в азимутальных отклонениях для событий, произошедших в разных зонах. Даны рекомендации по использованию значений азимута и медленности в отношении различных региональных фаз при обработке записей сейсмических событий.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая сеть Национального ядерного центра Республики Казахстан является одной из наиболее динамично развивающихся в мире среди сетей сейсмического мониторинга ядерных испытаний. Начиная с 2000 г, практически каждый год в строй действующих в Казахстане вводится новая сейсмическая станция. Регистрация данных мониторинга ведется в цифровом виде. Станции соединены системой коммуникаций с Центром сбора и обработки специальной сейсмической информации Института геофизических исследований НЯЦ РК (ЦСОССИ), созданным в городе Алматы, чем обеспечивается получение данных в режиме реального времени. В Центре проводится автоматическая и интерактивная обработка поступающих данных. На рисунке 1 показано расположение станций наблюдения НЯЦ РК и других организаций.

Сеть станций НЯЦ РК имеет ряд особенностей, отличающих ее от других сейсмических сетей, функционирующих на территории бывшего СССР. Во-первых, как видно из рисунка 1, все станции расположены, главным образом, по периметру территории

Республики Казахстан и на больших расстояниях друг от друга (более тысячи км). Во-вторых, сейсмические станции НЯЦ РК представлены в основном сейсмическими группами, состоящими из 9 и более элементов, расположенных в скважинах. Апертура сейсмических групп различна, но в большинстве случаев - 3-4 км. Каждая группа оснащена высокочувствительными однокомпонентными сейсмометрами и широкополосной трехкомпонентной станцией. Особенности сети мониторинга определяют специфику получаемых данных и требования к методике и технологии их обработки. В частности, большое количество слабых событий обнаруживается и локализуется по данным только одной сейсмической группы. Так, в сейсмологическом бюллетене ЦСОССИ более половины всех событий локализовано по данным только одной из групп (например, только по данным станции Каратау или только по данным станции PS23-Мақанчи). В связи с этим, чрезвычайно важной является достоверная оценка азимута прихода волны и кажущейся скорости, поскольку ошибки в их определении могут привести к серьезным ошибкам в локализации источников.

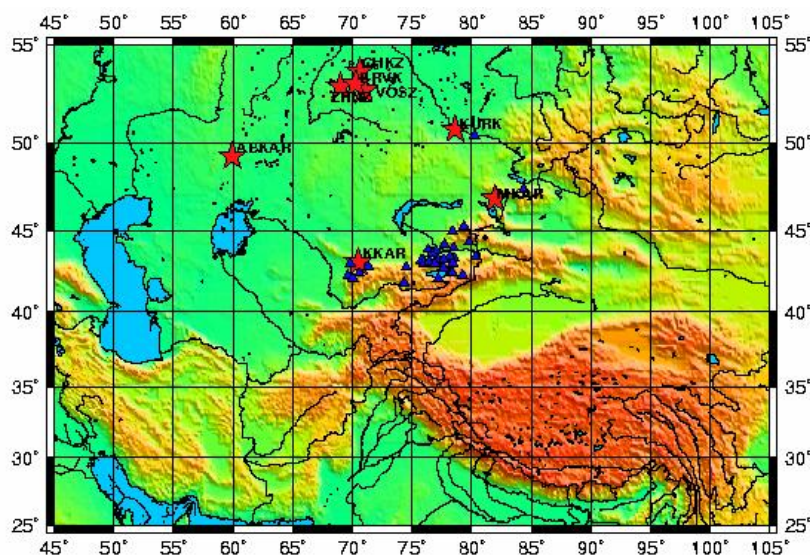


Рисунок 1. Наблюдательные сейсмические станции НЯЦ РК (звезды), СОМЭ МОН РК, Института сейсмологии Кыргызстана (треугольники)

Статья посвящена анализу достоверности определений азимута и медленности (величины, обратной кажущейся скорости) на примере сейсмической группы PS23-Мақанчи. Для различных региональных сейсмических фаз исследованы закономерности отклонения значений азимута и медленности, определенных экспериментально, от их «истинных» значений. Изучен вопрос о возможности проведения идентификации региональных сейсмических фаз по наблюдаемым значениям медленности сигналов. Результаты предназначены для совершенствования практики рутинной обработки записей региональных событий при сейсмическом мониторинге взрывов и землетрясений.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДАННЫХ

Сейсмическая группа PS23-Мақанчи введена в строй действующих в 2000 г. Станция входит в число 50 первичных станций Международной системы мониторинга. Начиная с февраля 2002 г., данные станции PS23-Мақанчи используются Международным центром данных (IDC, Вена) при составлении бюллетеня REB (Reviewed event bulletin). Для регионального сейсмологического бюллетеня ЦСОССИ Института геофизических исследований НЯЦ РК данные сейсмической группы используются с конца 2000 г.

PS23-Мақанчи включает (рисунок 2) 9 однокомпонентных вертикальных сейсмометров, расположенных по окружностям двух радиусов, а также две трехкомпонентные станции [1].

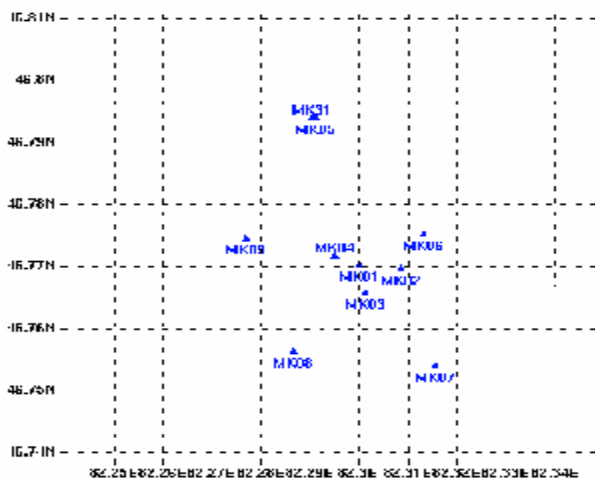


Рисунок 2. Расположение элементов сейсмической группы PS23-Мақанчи

Сравнение результатов обработки данных станции PS23-Мақанчи проводилось с «истинными» параметрами очагов, каталог которых создан следующим образом. Использованы два региональных каталога землетрясений: Сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) МОН Республики Казахстан; Синьцзянь – Уйгурского сейсмологического бюро (СУСБ) Китайской Народной Республики. Всего за период с 09. 2001 г. по 30.04.2002 г.

из каталогов выбрано 821 событие (СОМЭ) и 1171 событие (СУСБ). Каталоги были преобразованы в форматы, используемые для хранения результатов обработки данных станции PS23-Мақанчи. Для этого текстовые файлы, содержащие месячные каталоги, с помощью специально написанных программ преобразованы в таблицы Origin в формате CSS 3.0 [2]. Далее произведено ассоциирование записей сейсмической группы PS23-Мақанчи с событиями из каталогов. Для дальнейшего анализа отбирались события, для которых наблюдаемые времена вступления сейсмических фаз хорошо согласовывались с расчетными от известных гипоцентров, включенных в каталоги. При этом теоретические времена вступлений сейсмических фаз рассчитывались с использованием программы HYPOSAT [3]. В результате было отобрано 689 событий, в том числе, 513 из каталога СУСБ, 265 из каталога СОМЭ, 89 - входящих в оба каталога. При выборе из пар событий, попавших в оба каталога, одного события с более точным определением источника, дополнительно анализировалась разница времен между наблюдаемыми и теоретическими вступлениями различных фаз. Событие, для которого эта разница оказывалась наименьшей, оставлялось для дальнейшего анализа.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для всех событий, входящих в созданный каталог землетрясений были отобраны цифровые сейсмические записи станции PS23-Мақанчи по всем элементам группы, что позволило создать базу данных волновых форм.

На первом этапе аналитиками произведена предварительная интерпретация волновой картины записей и идентификация региональных фаз Pn, Pg, Sn и Lg. Именно эти фазы, времена вступлений которых используются при локализации источников, являются основными в практике рутинной обработки, проводимой различными Центрами данных Казахстана, использующими региональные годографы для Северного Тянь-Шаня и Центральной Азии (годограф Горбуновой И.В., годограф КСЭ [3]). Однако в соответствии со стандартным годографом IASPEI-91 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) [5] на региональных расстояниях существуют и могут быть дополнительно идентифицированы фазы Pb и Sb, что подтверждено опытом ЦСОССИ [6]. Поэтому произведено выделение фаз Pb и Sb для использования при дальнейших исследованиях. Для расстояний менее 200 км на записях выделялись также фазы, обозначаемые P и S. Таким образом, для исследования был определен следующий набор сейсмических фаз: P, S (для расстояний < 200 км.), Pn, Pg, Pb, Sn, Sb, Lg.

Определение азимута и кажущейся скорости региональных сейсмических фаз проводилось с использованием f-k - анализа, применяемого для интерпретации данных сейсмических групп [7]. F-k - анализ проводился с использованием набора фильт-

ров, применяемых при автоматическом обнаружении сигналов и их автоматической обработке [8]. Это 11 полосовых фильтров: 0.5-1.5 Гц (1); 0.5-2.0 Гц (2); 0.75-2.25 Гц (3); 1.0-2.0 Гц (4); 1.0-3.0 Гц (5); 1.5-3.0 Гц (6); 2.0-4.0 Гц (7); 3.0-6.0 Гц (8); 4.0-8.0 Г (9); 8.0-16.0 Гц (10); 0.8-4.5 Гц (11). Все используемые фильтры – типа Баттеруорта, порядок 3, двух видов - causal и zero-phrase (или non-causal). Расчет азимутов и медленности сигналов проведен с использованием программы EP, разработанной и предоставленной Норвежским центром НОРСАР [9]. Работа выполнялась полностью автоматически. Азимут (Az) и медленность (SI) сигналов определялись для 11 выбранных полос частот и для двух типов фильтров. При этом дополнительно варьировалась ширина временного окна, для которого проводился f-k – анализ: 3 сек, 4 сек, 5 сек. Таким образом, для каждой фазы каждого события f-k – анализ проводился 66 раз.

Кроме азимута и медленности, для каждого вступления фазы определялось отношение сигнала к шуму и усиление группы. Это делалось для того,

чтобы определить тот фильтр, который обеспечивает наибольшее отношение сигнала к шуму и высшее усиление группы.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ данных проводился по следующей схеме. Для каждой региональной сейсмической фазы по всем событиям, для которых с применением f-k анализа были рассчитаны азимут Az и медленность SI, определялась разница этих значений с их «истинными» значениями, включенными в каталог, т.е. невязка азимутов δAz и невязка медленности δSI . Такие определения получены по всем фильтрам с использованием разных временных окон. Затем по полученной выборке значений δAz и δSI для каждого фильтра построены распределения. В качестве параметров, характеризующих распределение В качестве параметров, характеризующих распределение, оценены медиана и процентиля на уровне 25% и 75%. В таблице 1 даны сводные оценки по каждой анализируемой региональной фазе.

Таблица 1. Результаты оценки азимута и медленности по региональным фазам для станции PS23-Маканци

Фаза	Число проассоциированных фаз	Предпочтительный фильтр	Медиана отклонений азимута	Медиана отклонений медленности
Pn	468	2 – 4 Hz	-2.4	0.3
Pg	64	1.5 – 3.0 Hz	-2.7	-2.9
Pb	135	1.5 – 3 Hz,	-2.36	-0.8
P	26	1.5 – 3.0 Hz	-1.8	-
Sn	311	1.5 – 3.0 Hz	-2.7	-1.7
Lg	285	1.0 – 2.0 Hz	-0.7	-2.9
Sb	111	1.5 – 3.0 Hz	-1.2	-1.7
S	25	1.0 – 2.0 Hz	-1.7	-

Как следует из таблицы, количество данных по каждой из фаз было различным. Это связано с разным количеством событий на разных расстояниях, различной четкостью проявления фаз на записях событий из разных районов. Наиболее представительными являются данные по фазам Pn, Sn и Lg, которые получены по нескольким сотням событий.

Первым результатом проведенного анализа является вывод о фильтрах, которые являются наиболее эффективными для обработки данных (столбец 3 таблицы 1). Для разных региональных фаз предпочтительны разные фильтры. Так, для Pn-волны предпочтительны наиболее высокочастотные фильтры (2 – 4 Гц), для S- и Lg-волн - наиболее низкочастотные фильтры (1 – 2 Гц). Полученный вывод согласуется с известными закономерностями о спектральном составе продольных и поперечных волн и о доминантных периодах в этих фазах [10], хотя следует отметить, что для вторичных S – P-фаз частотные фильтры совпадают. Сравнение результатов применения фильтров двух типов (causal и non-causal) пока-

зало, что разница между ними пренебрежимо мала, поэтому при дальнейшем анализе использовались данные, полученные с causal – фильтром.

Второй результат анализа относится к невязкам значений азимута δAz . В таблице 1 (столбец 4) представлены значения медианы распределения значений δAz для лучшего частотного фильтра. Видно, что для всех фаз азимутальные отклонения незначительны. Для разных типов волн значения невязок варьируют, но не превышают 2.7 град. Следовательно, азимуты для всех фаз определяются достаточно точно. Это свидетельствует об удачном выборе конфигурации группы и размещения датчиков в группе, обеспечивающем практически для любых региональных событий равноточное определение азимута. На рисунках 3а, в для волн Pn, Lg показано распределение невязок азимута δAz – медианы и процентилей на 11 выбранных частотных фильтрах. Разным цветом показаны результаты для разной ширины временного окна.

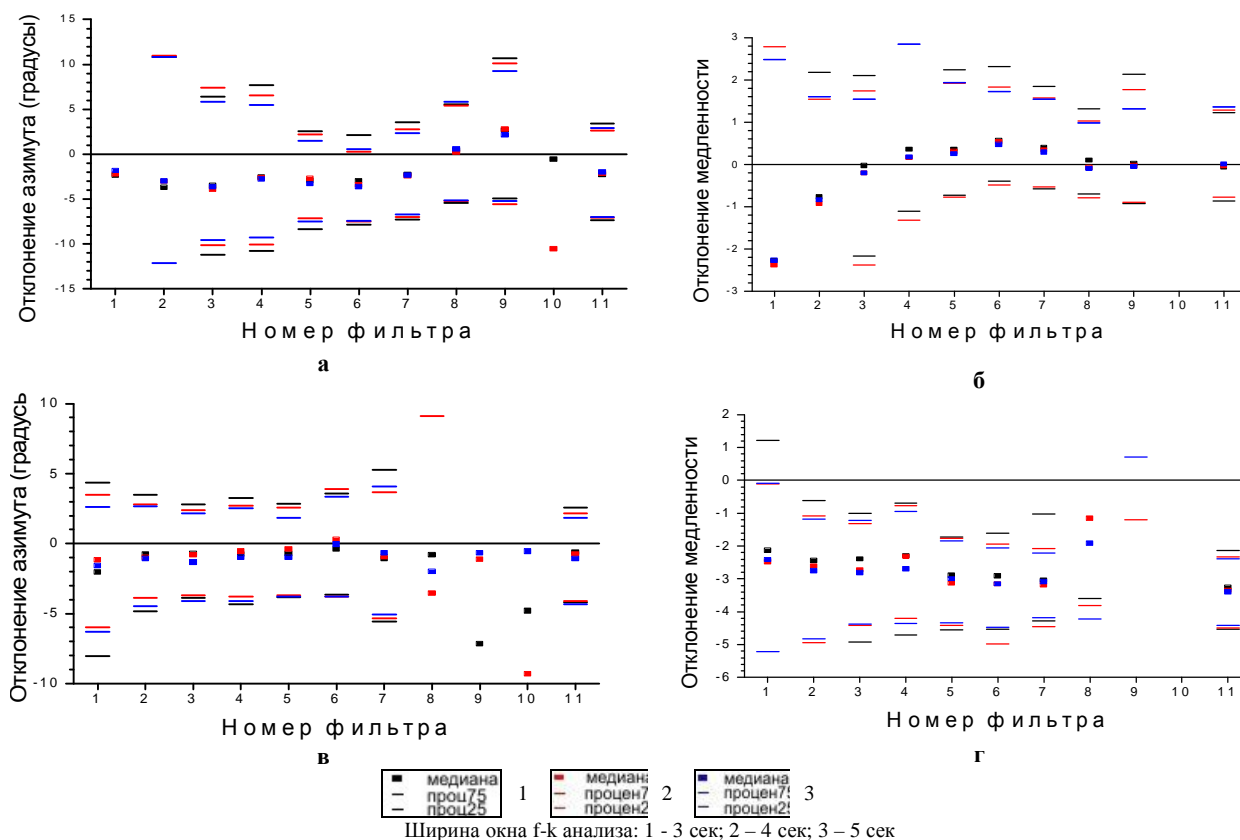


Рисунок 3. Азимутальные отклонения (а, в) и отклонения медленности (б, г) для фаз Pn (а, б) и Lg (в, г) при различных фильтрах

Из рисунка 3а видно, что ширина окна мало влияет на точность оценок Az по фазе Pn. Влияние фильтров также мало сказывается на значениях медианы распределения невязок, однако разброс данных существенно зависит от фильтра. Наименьший разброс данных наблюдается при фильтрах номеров 5 - 8. С учетом соотношения уровней сигнала и шума для практики рекомендовано применение фильтра № 7 - 2.0-4.0 Гц. Выводы относительно распределения азимутальных отклонений для фазы Lg (рисунок 3в) практически те же. Значение медианы невязок δAz для всех фильтров близки к нулю. Однако разброс данных сильно различается для разных фильтров. Наиболее предпочтительным является фильтр № 4 - 1-2 Гц.

Рассмотрен вопрос о систематических отклонениях в значениях азимута в отношении к эпицентральной зоне. На рисунке 4а значения δAz отнесены к конкретным эпицентрам события. Величина невязки показана цветовой гаммой.

Можно отметить четкие пространственные закономерности в распределении азимутальных отклонений. К востоку от станции PS23-Макаంచి азимутальные отклонения почти нулевые и отчасти положительные, в то время как к западу от станции отклонения преимущественно отрицательные. Однако во всех случаях по абсолютной величине отклонения невелики. Это говорит о том, что значения

азимутов, определяемые по данным сейсмической группы PS23-Макаంచి, можно использовать при локализации событий как один из определяющих параметров, наряду с временами вступления фаз.

Следующий результат исследования относится к параметру медленности SI и его отклонениям δSI . Как можно видеть из таблицы 1, значения δSI существенно зависят от сейсмической фазы, используемой при обработке. Если для фазы Pn отклонение медленности в среднем имеет вполне приемлемое значение - 0.3 сек/град (здесь в градусах измерено расстояние), то для фаз Pn и Lg медианные значения отклонения медленности составляют (- 2.9) сек/град, что очень значительно. На рисунках 4б, г показано графическое распределение невязок медленности для сейсмических фаз Pn и Lg при 11 фильтрах. Также как в случае рассмотрения δAz , результаты показаны для трех значений ширины окна f-k анализа - 3, 4 и 5 сек. Для фазы Pn и фильтров №№ 4 - 11 медианные значения отклонения медленности близки к нулю. Наименьший разброс значений невязок наблюдается при фильтре № 8 - 3 - 6 Гц. В отличие от азимутальных невязок, где отклонения от медиан в обе стороны примерно равны, невязки медленности распределены существенно ассиметрично. Для фазы Lg отклонения медленности существенно отрицательны при всех фильтрах.

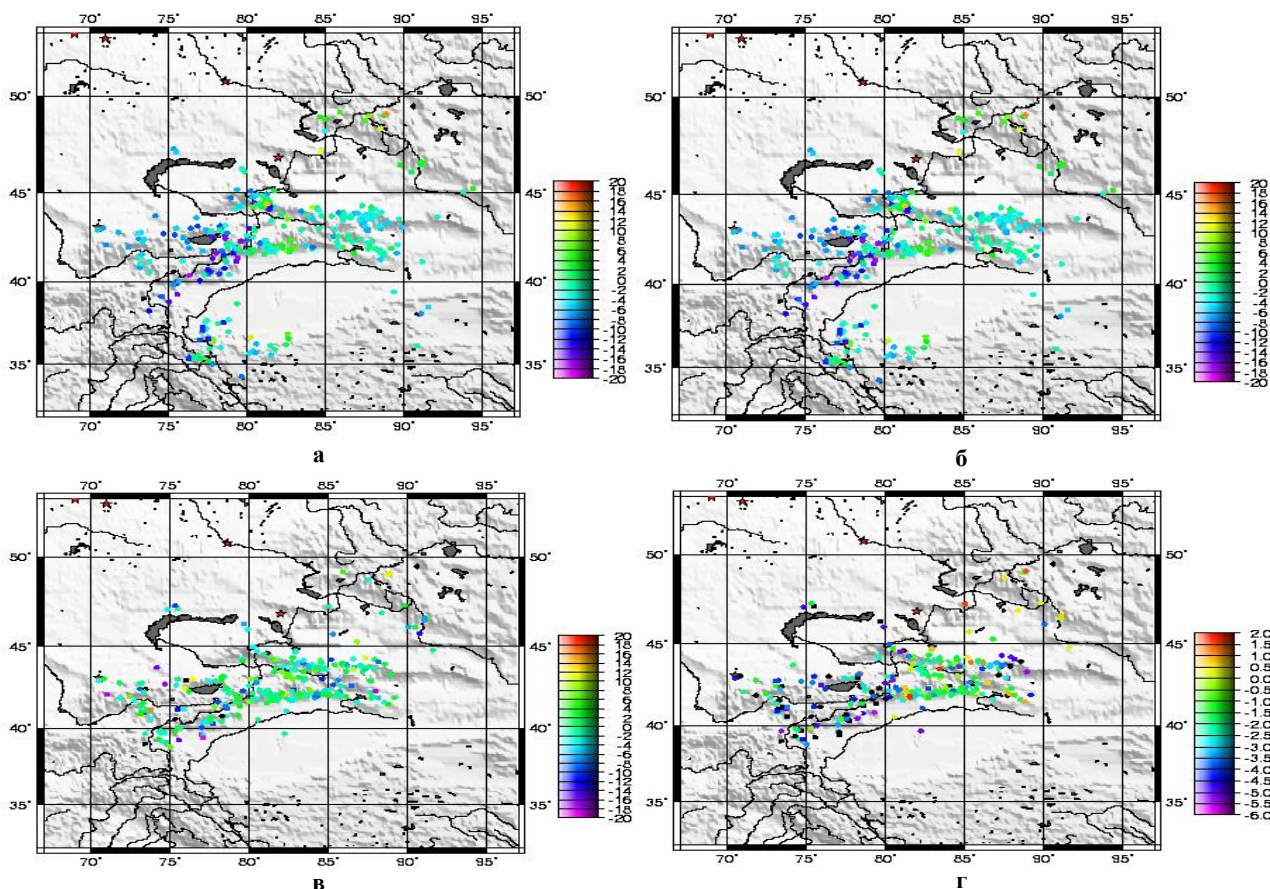


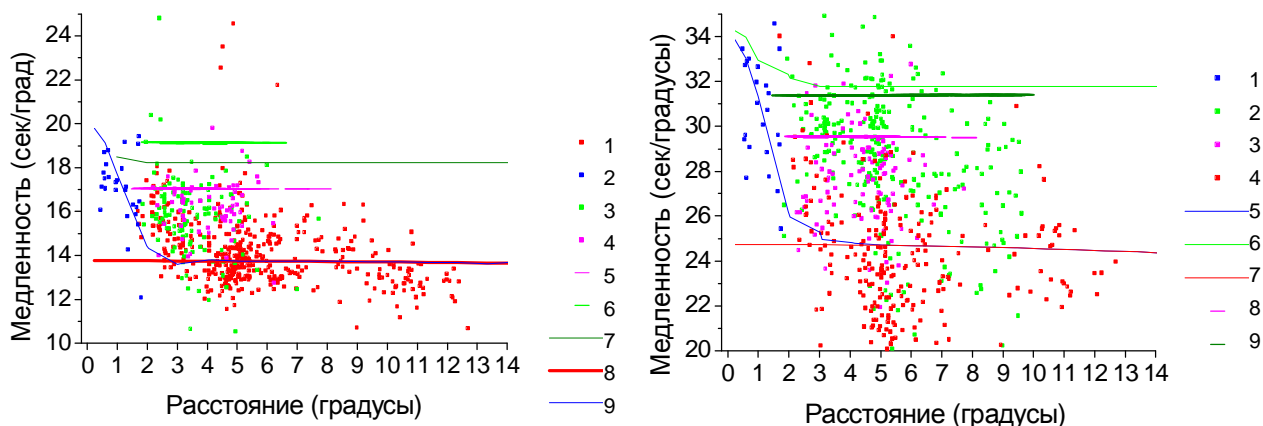
Рисунок 4. Распределения азимутальных отклонений (а, в) и отклонений медленности (б, г) для фаз Pn (а, б) и Lg (в, г)

На рисунках 4 б, г показана картина пространственного распределения значений отклонений медленности для фаз Pn и Lg, которая отличается от распределения значений δAZ (рисунок 4 а, в). Для фазы Pn и для событий, произошедших на широте 43° с.ш. и севернее, отклонения медленности практически равны 0 или отчасти положительные. Для событий южнее 43° отклонения параметра медленности резко отрицательные. Поскольку распространение Pn – волны тесно связано с границей Мохо, можно предположить, что в данном районе имеет место изменение глубины этой границы. Для фазы Lg картина совершенно другая. Для событий, эпицентры которых расположены на одной долготе со станцией PS23-Маканчи или немного восточнее ее, медленность незначительно отличается от теоретической. Для «западных» событий отмечены очень большие отрицательные значения в отклонениях медленности.

ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ФАЗ ПО ЗАПИСЯМ СТАНЦИИ PS23-МАКАНЧИ

На рисунке 5 показаны экспериментальные значения медленности для разных региональных фаз, а также теоретические значения, соответствующие этим фазам. Для фаз P_g и L_g нанесены по две теоретические зависимости, поскольку в разных программных пакетах годограф IASPEI 91 для этих фаз имеет разные программные версии.

Для близких событий (т.е., на расстоянии 200 и менее километров от станции) медленность волны существенно зависит от расстояния (на рисунке 5 такие события отмечены синим цветом). Результат согласуется с теоретическими значениями медленности для этих фаз - прямой P и прямой S - волн. Следует отметить, что в практике Международного центра данных первые вступления от близких событий называются P_g и L_g. Но, как видно из рисунка 5, по экспериментальным данным на этих расстояниях волны ведут себя как прямые P и S – волны, их медленности существенно зависят от расстояния. В то же время теоретические значения медленности фаз P_g и L_g на этих расстояниях (для обоих типов годографов) практически не зависят от расстояния. У событий, произошедших на расстояниях $2^{\circ} - 4^{\circ}$ от станции теоретически можно наблюдать 3 вступления для продольных волн (P_g, P_b и P_n волны). Теоретические значения медленности для продольных волн приведены на рисунке 5а. Однако, экспериментально полученные значения медленности для рассматриваемых расстояний у различных фаз практически неразличимы. Таким образом, медленность сигнала для идентификации различных продольных волн на расстояниях $2^{\circ} - 4^{\circ}$ от станции PS23-Маканчи не может быть использована.



Наблюденная медленность фаз: 1 - Pn; 2 - P; 3 - Pg; 4 - Pb. Теоретическая медленность фаз: 5 - Pb; 6 - Pg (Hyposat); 7 - Pg (Seatools); 8 - Pn; 9 - P

Наблюденная медленность фаз: 1 - S; 2 - Lg; 3 - Sb; 4 - Sn. Теоретическая медленность фаз: 5 - S; 6 - Lg (Seatools); 7 - Sn; 8 - S; 9 - Lg (Hyposat)

Рисунок 5. Сравнение теоретической и наблюдаемой медленности для фаз: а - P, Pn, Pg, Pb; б - S, Sn, Sb, Lg

Для поперечных волн (рисунок 5 б) наблюдается несколько иная картина. Несмотря на то, что облака экспериментально полученных значений медленности фазы Lg и фазы Sb перекрываются, в среднем значения медленности фазы Sb заметно отличаются от значений медленности фазы Lg, и близки к теоретическим значениям фазы Sb. Исходя из этого, можно сделать вывод, что медленность волны может быть использована как один из параметров для распознавания фаз Sb и Lg. Для фазы Sn медленность определяется неустойчиво, существует большой разброс в экспериментально полученных значениях. Из рисунков 5 следует еще один вывод. Для фаз Pn и Lg по экспериментальным данным наблюдается заметное уменьшение значений медленности с расстоянием, непрогнозируемое теоретическими зависимостями. Объяснение причин такого явления требует дополнительных исследований.

Выводы

На примере сейсмической группы PS23-Маканчи исследованы азимутальные отклонения и отклонения параметра медленности (разница наблюдаемых и расчетных значений) для следующего набора региональных сейсмических фаз: первая P, Pn, Pg, Pb, первая S, Sn, Sb, Lg. Выявлено наличие определенных закономерностей в отклонениях. Для всех сейсмических фаз азимутальные отклонения небольшие, что свидетельствует о том, что при локализации событий можно использовать азимут в качестве определяющего параметра. В то же время медленность сигнала можно использовать для локализации событий только для волны Pn и первой P. Для волн Pg и Lg наблюдается большое различие между теоретическими и экспериментально полученными значениями медленности, примерно 2.9 сек/градус, что необходимо учитывать при идентификации сейсмических фаз при обработке событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неделков А.Н. Исследования по выбору площадок для новых сейсмических групп на территории Казахстана//Геофизика и проблемы нераспространения. - Вестник НЯЦ РК. - Курчатов: НЯЦ РК, 2001. - Вып. 2. - С. 48 - 54.
2. J. Andeson, W.E. Farrell et al. Center for seismic studies. Version 3 Data base: Shema refence manual//Technical Repot C 90-01. - Arbrington, 1990.
3. J. Schweitzer HYPOSAT – An Enhanced Routine to Locate Seismic Events//Pure appl. Geophys, 2001. - 158. – P. 277 – 289.
4. Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км//Труды Института физики Земли АН СССР. - М.: Наука, 1964. - № 32. - С. 63 - 87.
5. В. Kennett (editor) IASPEI 1991. Seismological Tables, Research Schol of Earth Sciences. - Australian National University, 1991.
6. Михайлова Н.Н., Аристова И.Л., Германова Т.И. Годограф сейсмических волн по результатам регистрации сигналов от химических взрывов//Геофизика и проблемы нераспространения/Вестник НЯЦ РК.- Курчатов: НЯЦ РК, 2002. – Вып. 2. - С. 46 - 54.
7. J. Capon High-resolution frequency – wavenumber spectrum analysis// Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineeers. – 57. – P. 1408 - 1418.
8. Михайлова Н.Н., Синева З.Н. Обработка данных сейсмических станций НЯЦ РК//Геофизика и проблемы нераспространения/Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2002. – Вып. 2. - С. 64 - 68.
9. J. Fyen Event processor program package//NORSAR Semiannual Technical Summary. 1 Oct 1988–31 Mar 1989/ Scientific report 2-88-89. - Kjeller, Norway.
10. Антонова Л.В. и др., Экспериментальные сейсмические исследования недр Земли. – М.: Наука, 1978. - 157 с.

**PS23-МАҚАНШЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ТОБЫНЫҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША АУМАҚТЫҚ
ФАЗАЛАР ҮШІН АЗИМУТТАРЫ МЕН ШАБАНДЫҒЫН БАҒАЛАУ ТУРАЛЫ**

Синева З.И.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

PS23-Мақаншы сейсмикалық тобының үлгісінде, тіркелетін аумақтық сейсмикалық фазаларының келесі жиынтығына: бірінші P, Pn, Pg, Pb, бірінші S, Sn, Sb, Lg, азимутальдік ауытқуы және шабандығының ауытқуы зерттелген. Әр белдемдерде болған оқиғалар үшін азимутальдік ауытқуының заңдылығы анықталған. Сейсмикалық оқиғаларының жазбаларын өңдеуінде әр түрлі аумақтық фазаларына катысты азимут пен шабандығының мәндерін пайдалану бойынша ұсыныстар берілген.

**ON AZIMUTH AND SLOWNESS ASSESSMENTS FOR REGIONAL PHASES
ACCORDING TO PS23-MAKANCHI SEISMIC ARRAY DATA**

Z.I. Sinyova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Azimuth and slowness deviations were studied by the example of PS23-Makanchi seismic array for the following regional seismic phases: first P, Pn, Pg, Pb, first S, Sn, Sb, Lg. Regularity in deviation was specified for the events in various areas. Recommendations were given according to the possibility of azimuth and slowness values use in respect of various regional phases while seismic event processing.