

УДК 550.34; 531/534; 627.8

Довгань В.И.<sup>1</sup>, Фролова А.Г.<sup>2</sup>

1 - МНИЦ «Плотина» при КРСУ,  
2 - Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан

## К ВОПРОСУ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗАПИСЯМ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТОКТОГУЛЬКОЙ ПЛОТИНЕ

**Аннотация.** В статье даны примеры определения азимута на эпицентр и самого эпицентра по записям землетрясений Токтогульской цифровой сетью. Показано, что информацию о расположении эпицентра несёт только начальная часть записи продольных волн.

**Ключевые слова:** плотина, землетрясения, азимуты на эпицентр.

## ТОКТОГУЛ ПЛОТИНАСЫНДАГЫ СЕЙСМОМЕТРИКАЛЫК БАЙКООЛОРДУН САНАРИПТИК СИСТЕМАСЫНЫН ЖАЗУУЛАРЫ БОЮНЧА ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРДУН ЛОКАЛДАШУУ МАСЕЛЕСИНЕ КАРАТА

**Кыскача мазмуну.** Макалада эпиборборго карата азимутту жана эпиборбордун өзүн Токтогул санариптик түйүнүнүн жер титирөөлөрдү жазуусу боюнча аныктоо мисалдары келтирилген. Эпиборбордун жайгашуусу тууралуу маалыматты туурасынан кеткен толкундарды жазуунун баштапкы бөлүгү гана алып жүрөт.

**Негизги сөздөр:** плотина, жер титирөөлөр, эпиборборго карата азимуттар.

## TO PROBLEM OF EARTHQUAKES LOCALIZATION ACCORDING TO RECORDS OF THE SYSTEM OF SEISMOMETRY OBSERVATIONS ON THE TOCTOGUL DAM

**Abstract.** In the article the examples of azimuth determination on an epicentre and epicenter on the earthquakes records of Toktogul digital network are given. It is shown that information about the location of epicenter is carried only by initial part of longitudinal wave records.

**Keywords:** dam, earthquakes, azimuths to epicenter.

Цифровая система сейсмометрических наблюдений, установленная на Токтогульской плотине в 2005 году, к настоящему времени зарегистрировала более 400 землетрясений, половина из которых произошла в ближней зоне и порядка 60-и в пределах первых 10 км от гидросооружения. Каталог землетрясений включает в себя координаты эпицентра, расстояние от него до плотины, энергетический класс, интенсивность колебаний в каждой точке наблюдений в баллах и магнитудах с учётом спектрального состава. Определение координат большей части близких землетрясений (при условии чётких вступлений продольных и поперечных волн) выполнялось азимутальным методом Голицина [1] по записям в опорной точке наблюдений, расположенной вблизи плотины в скале. Метод основан на измерении амплитуд первых

вступлений продольных волн на записях двух горизонтальных сейсмографов, ориентированных по сторонам света. Третий вертикальный сейсмограф позволяет определить направление движения волны (сжатие или растяжение). Необходимым условием использования этого метода является синхронность измеряемых моментов вступлений волн и правильной поляризации компонент. Для определения эпицентрального расстояния использовался годограф Т.М. Сабитовой, построенный для Токтогульского района для разных глубин очага [2]. В тех случаях, когда первые вступления продольных волн были ниже уровня шума плотины, для создания каталога были использованы данные обработки сети станций ИС НАН КР и Казахского Центра данных ИГИ РК ([www.kndc.kz](http://www.kndc.kz)). Очень слабые землетрясения с энергетическими классами 4-5, происходили непосредственно под плотиной и не всегда фиксировались другими сетями наблюдений, поэтому азимутальный метод являлся единственно возможным для их локализации.

Трёхкомпонентные цифровые пункты сейсмометрических наблюдений на Токтогульской ГЭС и созданный в Центре обработки информации (МНИЦ-Плотина) пакет программ позволяют достаточно точно определять азимут на эпицентр. Предварительная фильтрация цифровых записей даёт возможность значительно подавить шумы плотины. Программа обработки позволяет в случае необходимости переходить от записей скоростей к записям смещений и ускорений колебаний грунта.

Задача уточнения положения эпицентров особенно важна для землетрясений, происходящих вблизи Токтогульской плотины, что позволяет выявить наиболее сейсмически опасные для неё зоны. Так, например, уточнение координат эпицентров местных землетрясений на основе азимутального подхода позволило выделить очаговую зону в пределах первых 5 км от плотины, связанную с Карасуйским разломом. Активизация этой зоны произошла в июле-августе 2006 г., где в течение двух недель было зафиксировано 18 толчков, два из которых превысили 11-й энергетический класс и ощущались в верхних точках плотины с интенсивностью более шести баллов. Эта зона «работает» и в настоящее время, разряжаясь единичными слабыми землетрясениями. При определении азимута возникает вопрос – какая часть записи землетрясения несёт информацию о направлении на эпицентр? Рассмотрим этот вопрос на примере записи самого сильного местного землетрясения из «карасуйской зоны» (энергетический класс  $K=11.6$ ) с чёткими моментами вступлений продольных и поперечных волн, произошедшего 30 июля 2006 г. Записи получены в опорной точке Токтогульской системы наблюдений, расположенной в 700 метрах от плотины в скале (рисунок 1).

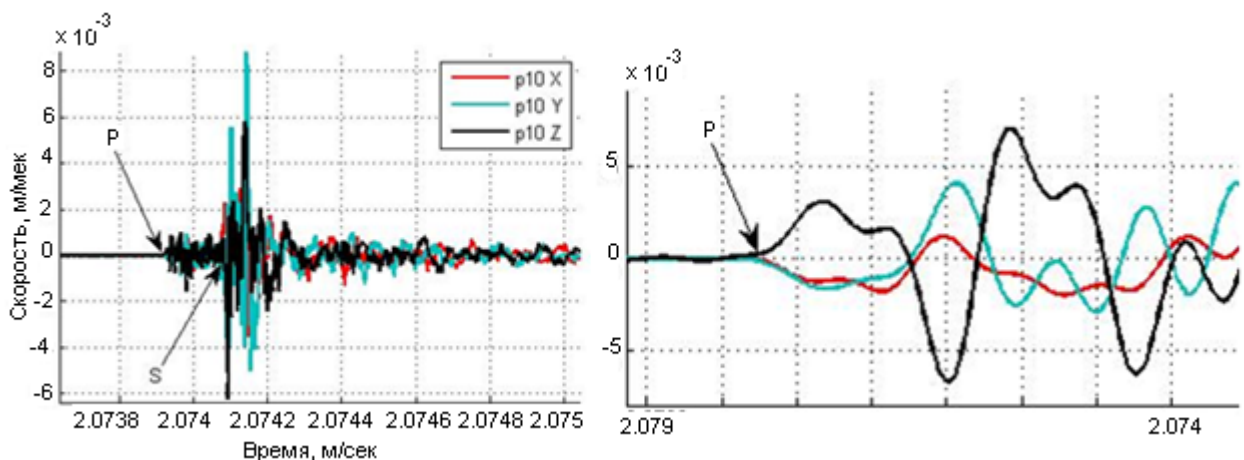


Рис. 1. Записи землетрясения 30 июля 2006 г. на трёх составляющих, стрелками показаны моменты вступлений продольных P и поперечных S волн (слева), справа - начальная часть записи продольных волн P.

Выделим на записи продольных волн (рисунок 1, справа) начальный участок (до первого максимума) и определим по нему направление на эпицентр (рисунок 2).

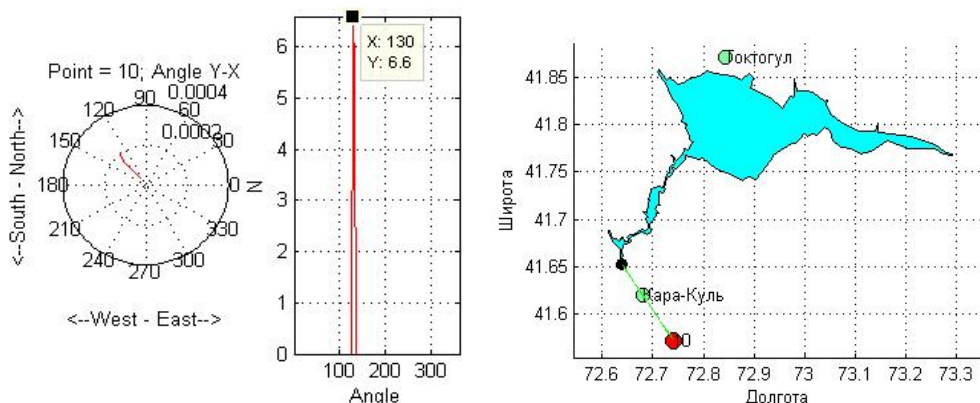


Рис. 2. Проекция движения точки на плоскость Y- X для начального участка записи (слева) и положение эпицентра (справа).

Для этого участка записи движение показывает направление, противоположное эпицентру. Угол с осью X составляет 130 градусов. Направление на эпицентр, как единичное значение, по программе определяется достаточно надёжно.

Для более расширенного участка (рисунок 3) угол 130 градусов сохраняется, но появляются дополнительные движения со значительным количеством углов в 151 градус. Направление на эпицентр, как среднее для этого участка, также определяется правильно.

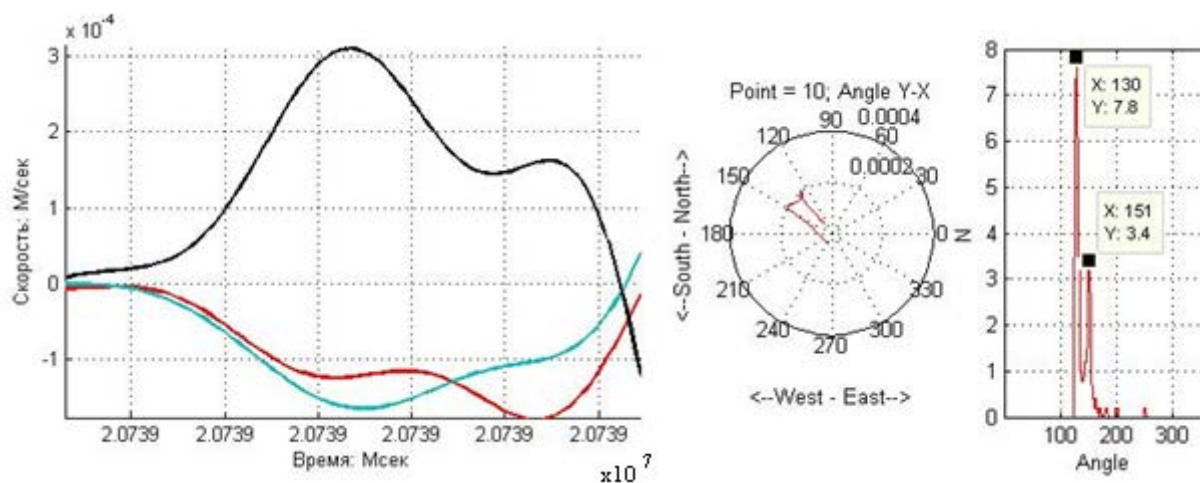


Рис. 3. Участок записи и проекция движения точки на плоскость X-Y для данного участка записи.

Следующий участок записи (рисунок 4) и проекция на плоскость Y- X показывают движение в сторону эпицентра, но с погрешностью порядка 20 градусов.

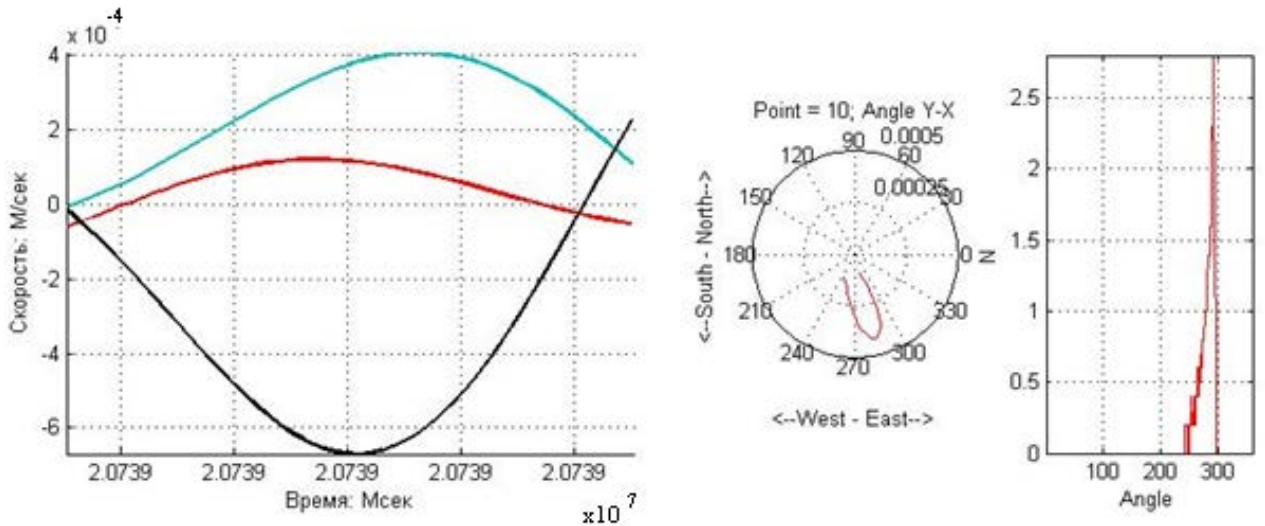


Рис. 4. Второй участок записи и проекция движения точки на плоскость X-Y.

При объединении первых двух участков появляются углы в 130, 150 и 292 градуса (рисунок 5). Направление на эпицентр, как среднее для объединённого участка, определяется достаточно точно.

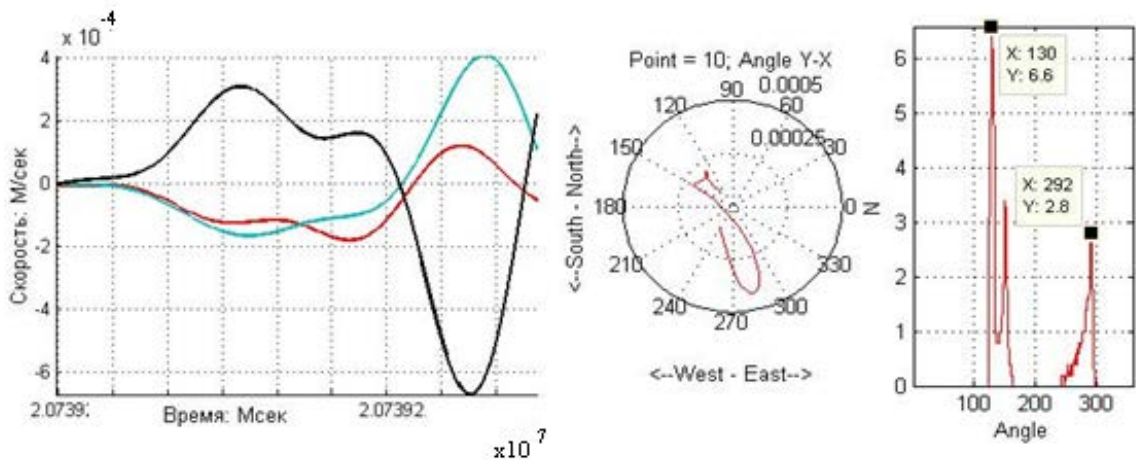


Рис. 5. Участок записи и проекция движения точки на плоскость Y-X.

Третий участок записи также показывает направления движения, противоположные от эпицентра, но уже более хаотические, максимальное количество углов с осью X составляют 118 градусов и 174 градуса (рисунок 6).



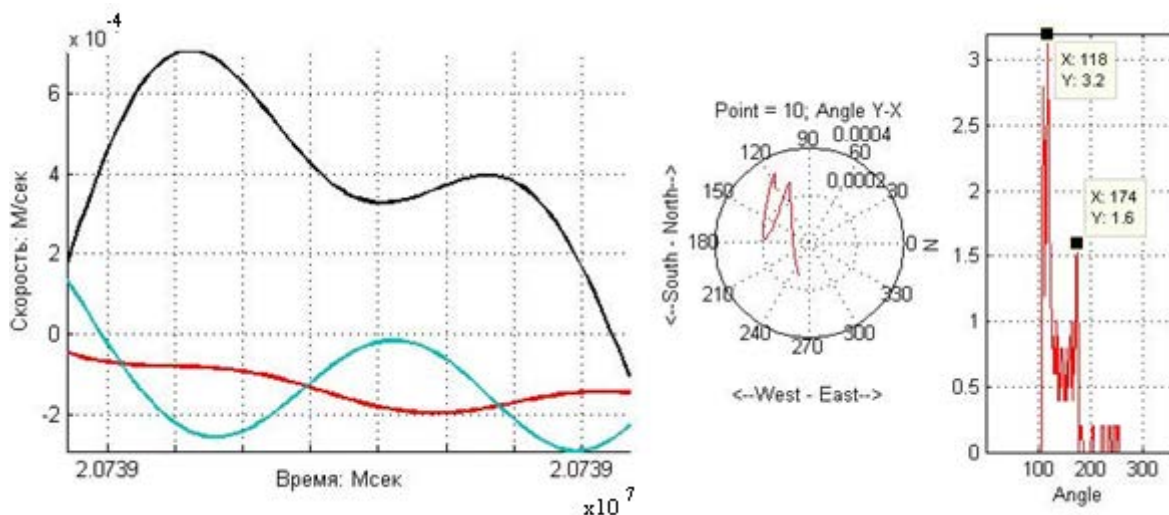


Рис. 6. Третий участок записи и проекция движения точки на плоскость X-Y.

Далее уже начинается собственно кода продольных волн – т.е. колебания, вызванные рассеянием сейсмической энергии в неоднородной среде (рисунок 7).

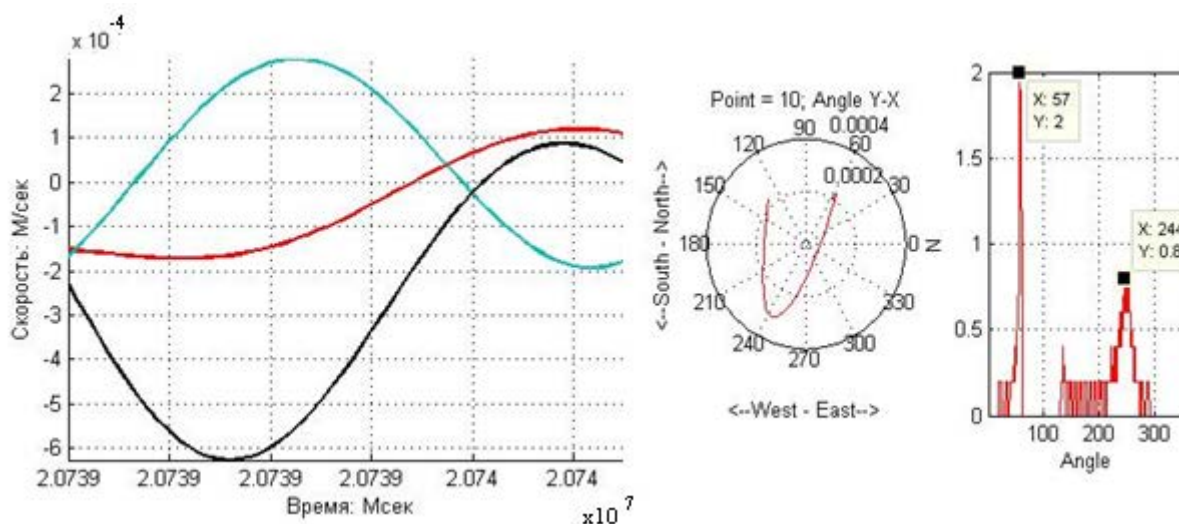


Рис. 7. Четвёртый участок записи и проекция движения точки на плоскость Y-X.

Таким образом, направление на эпицентр для местных землетрясений можно определять достаточно надёжно как единичное значение для начального участка и как среднее для начального участка записи длительностью 1.5 -2 первых периода колебаний.

Использовать поперечные волны для определения направления на эпицентр практически не удаётся. Вступление этих волн происходит на фоне предшествующих колебаний. Возможно, эти волны имеют другие пути распространения, отличающиеся от продольных волн. Для записи данного землетрясения на плотине характерно чёткое вступление поперечной волны, тем не менее, правильно определить положение эпицентра не удалось (рисунок 8).

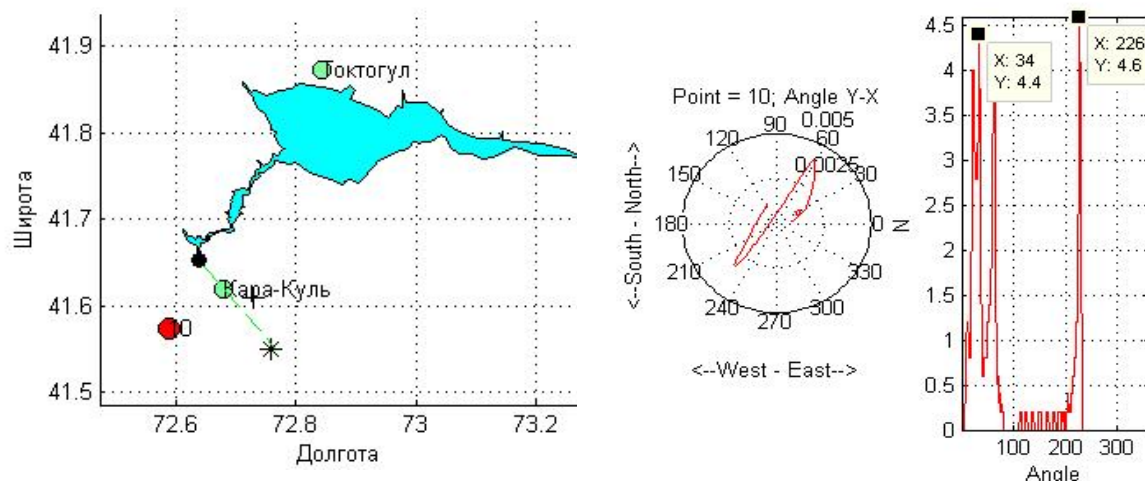


Рис. 8. Слева: положение эпицентра по записи S-волн (красный кружок) и истинное его положение (звёздочка); справа — проекция движения точки на плоскость Y-X по начальному участку записи поперечных волн.

Определить азимут на эпицентр по записи землетрясения 24 января 2007 г. в 23 час 36 мин., произошедшего в 100 км от плотины с энергетическим классом  $K=11.9$ , было сложно: очень слабое первое вступление с последующим постепенным нарастанием амплитуд (рисунок 9, слева). После фильтрации и «растягивания» можно выделить начало записи (рисунок 9, справа).

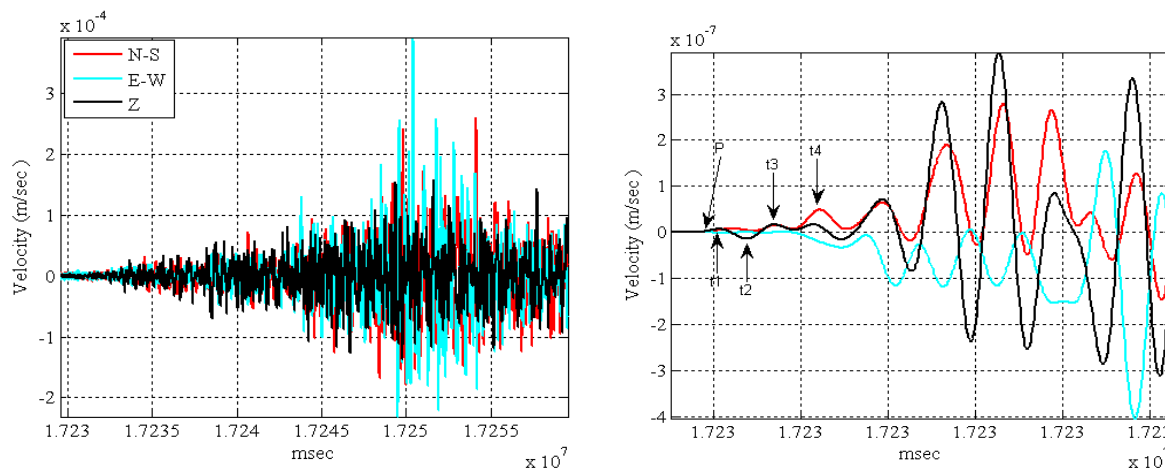


Рис. 9. Слева - записи землетрясения в опорной точке на трёх составляющих; справа - начальная часть записей после фильтрации.

Определив направления на эпицентр в моменты времени, отмеченные на рисунке 10, становится ясно, что наиболее оптимальным вариантом, близким к истинному, является направление 5 как среднее значение для начального интервала записи. Преобладающие углы движений десятой точки при этом землетрясении по начальной части записи также показывают направление с северо-востока на юго-запад (рисунок 11).

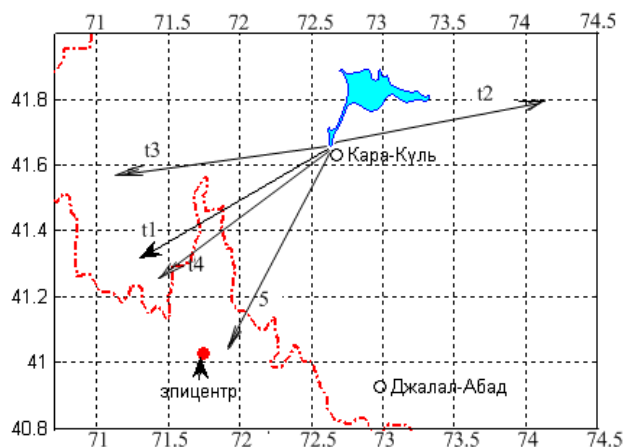


Рис. 10. Направления на эпицентр в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ . Кругом показано положение эпицентра по данным Института сейсмологии НАН КР.

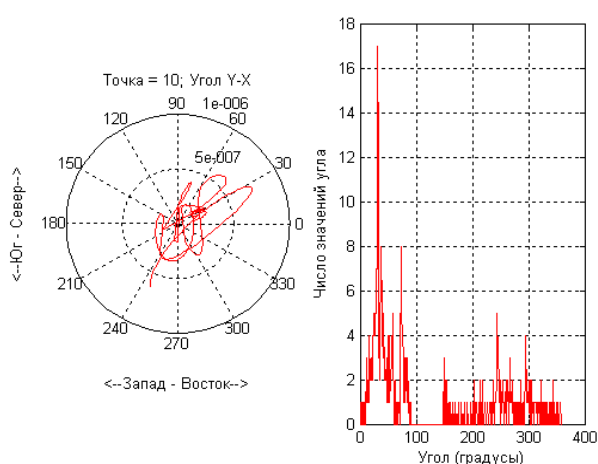


Рис. 11. Проекция движения десятой точки на плоскость У-Х по начальной части записи землетрясения.

При чётком первом вступлении удалённых землетрясений направление на эпицентр определяется по единичному значению амплитуд и знаков колебаний на трёх составляющих. Если вступление продольных волн слабое с последующим нарастанием амплитуд и искажено микросейсами, то после фильтрации азимут лучше определять по средним значениям углов движения точки.

Местное землетрясение 20 сентября 2011 г. в 03 час. 03 мин. интересно тем, что произошло оно непосредственно под плотиной при нулевом эпицентральной расстоянии, поэтому дадим ему более полную характеристику. На спектрограмме по записи скорости (точка 10, составляющая С-Ю) видно, что колебания наблюдались вплоть до самых высоких частот (рисунок 12).

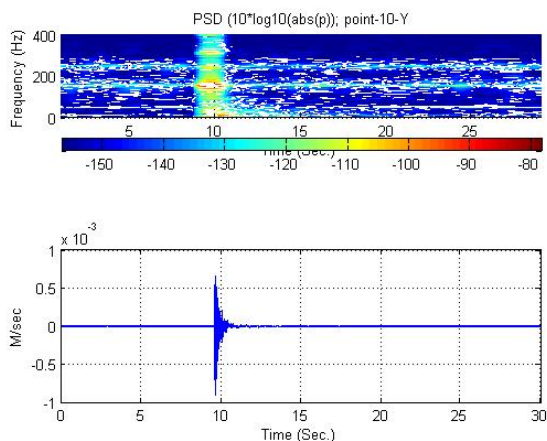


Рис. 12. Спектрограмма по записи в 10-ой точке (составляющая С-Ю).

Горизонтальные составляющие высокочастотны, записи имеют импульсную форму, колебания резко нарастают до максимума и постепенно спадают. Полная длительность колебаний порядка двух секунд. Вертикальная составляющая более низкочастотна. Через 0.4 сек после первого вступления на всех трёх составляющих формируется группа более длиннопериодных колебаний, похожих на поверхностную волну (на рисунке 13 отмечена цифрой 2).

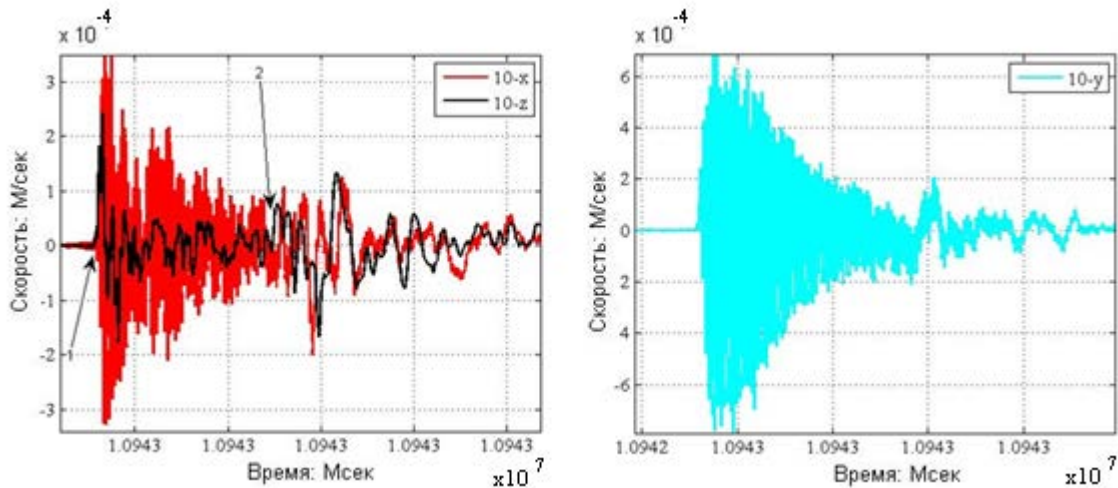


Рис. 13. Записи скорости землетрясения в десятой точке слева по составляющим (В-З) и вертикальной, справа – по составляющей С-Ю.

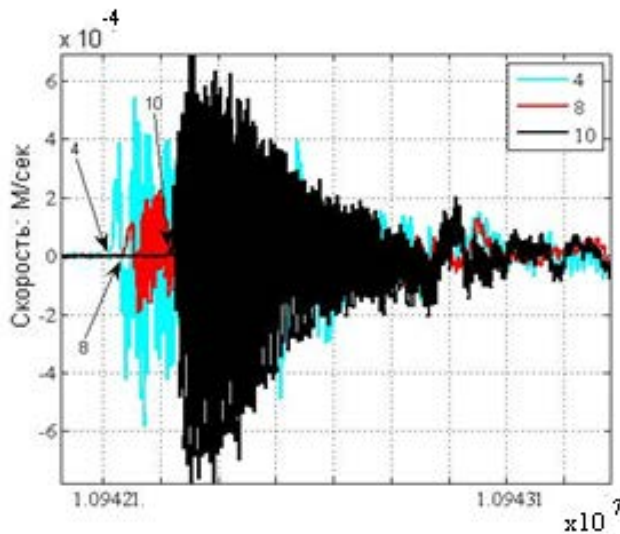


Рис. 14. Записи землетрясения в 4-ой, 8-ой и 10-ой точках (составляющая С-Ю). Стрелками отмечены моменты вступления сейсмических волн в этих точках наблюдений.

Максимальными были амплитуды колебаний в десятой точке, но первыми сейсмические волны вступили в правый борт плотины. Разница между вступлениями, отмеченными на рисунке 14, невелика – сотые доли секунды, но она хорошо видна.

Судя по записям землетрясения, толчок произошёл непосредственно под плотиной ближе к правому её борту и на небольшой глубине – в приповерхностном слое. Интенсивность колебаний в разных точках наблюдений показана на рисунке 15 и в таблице 1.



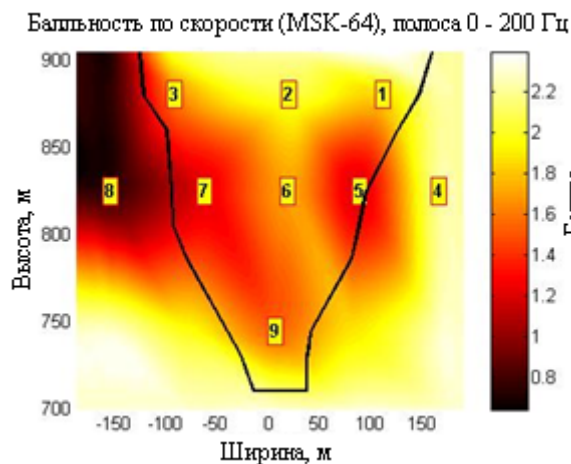


Таблица 1

№ точки	балл по скорости	по магнитуда
1	1.9	3.58
2	2.0	3.78
3	1.6	3.52
4	2.2	3.44
5	1.2	3.31
6	1.7	3.48
7	1.2	3.31
8	0.8	3.02
9	1.6	3.52
10	2.3	3.37

Рис. 15. Распределение интенсивности колебаний по телу плотины.

Колебания в десятой, четвёртой и второй точках превысили два балла. Магнитуда в точках регистрации при такой балльности оказалась выше ожидаемой из-за наложения высокочастотных колебаний.

Направление на эпицентр по записям точек 4, 8 и 10 показано на рисунке 16. Если взять пересечение данных 4 и 8-й точек, то координаты эпицентра будут следующие:  $\varphi=41.6769^\circ$ ,  $\lambda=72.6261^\circ$ . На том же рисунке показано положение эпицентра по данным Казахского Центра данных ИГИ РК. Можно утверждать, что положение эпицентра по нашим данным более точное. Приведённый выше анализ показал, что он находился со стороны правого борта плотины.

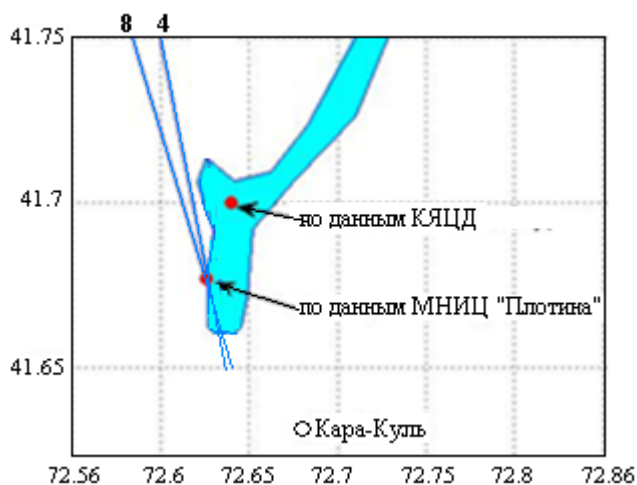


Рис. 16. Направления на эпицентр по данным трёх точек наблюдений.

Землетрясение было слабым, максимальное смещение по записям 4-ой точки 5.64 микрона, энергетический класс  $K=6.6$ .

### Выводы

Точное определение основных параметров землетрясений (координат эпицентра и глубины очага) является одной из основных проблем в сейсмологии. Даже при достаточно хорошем окружении сейсмических станций погрешность в определении координат может превышать 5 км. В первую очередь это связано с тем, что среда, в которой распространяются сейсмические волны, неоднородна по своему строению. При

определении же параметров очагов используются осреднённые для определённого района годографы сейсмических волн.

Для уточнения координат местных и близких землетрясений, зарегистрированных Токтогульской системой наблюдений, был использован методический приём, основанный на определении азимутов на эпицентр и разности вступлений продольных и поперечных волн. Наши исследования показали, что информацию о направлении на эпицентр несёт только начальная часть записи продольных волн, в основном, в пределах двух - трёх периодов колебаний. При слабом первом вступлении более точное направление даёт среднее значение для начального участка записи. Более поздние участки записи характеризуют хаотические движения возмущённой среды – собственно коду Р-волн. Азимутальный метод позволяет достаточно точно определять положение эпицентров местных и близких землетрясений даже по одной станции. Этот метод был единственно возможным для локализации слабых местных толчков непосредственно под плотиной, которые не фиксировались другими сетями наблюдений.

Азимутальный метод определения эпицентров местных землетрясений может быть использован для уточнения положения сейсмоопасных зон вблизи стратегических объектов.

### Литература

1. Голицин Б.Б. Избранные труды. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - Т.2. - 465 с.
2. Сабитова Т.М. Глубинное строение земной коры Тянь-Шаня и выделение зон возможных очагов землетрясений (по данным сейсмологии). Автореферат диссертации на соискание учёной степени д. г.-мин. наук, Бишкек, 1995.

*Рецензент: д. ф.-м. н. Погребной В.Н.*