



Геомодель



РОЭК

ЛЮДИ. ТЕХНОЛОГИИ. ЗНАНИЯ

Российская отраслевая энергетическая конференция

1-й съезд Ассоциации геологов,
геофизиков и инженеров

15–17 ОКТЯБРЯ 2024 Г. | МОСКВА, РОССИЯ

www.geomodel.ru

Оперативный мониторинг гидроразрыва высокой точности и помехоустойчивости с использованием интеллектуального робота «АРИО»

А.А.Табачков, Ю.А.Степченков, В.Н.Ференци

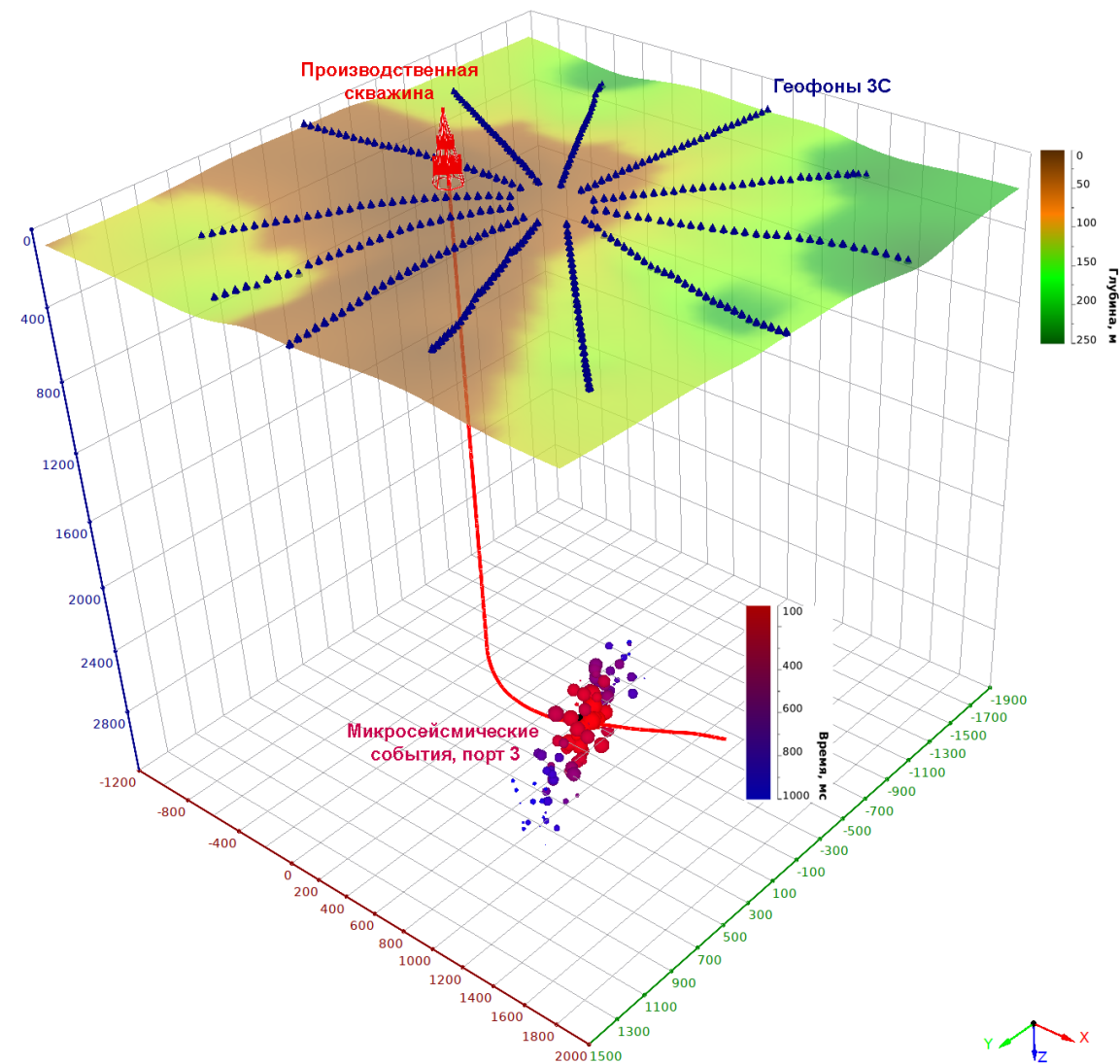
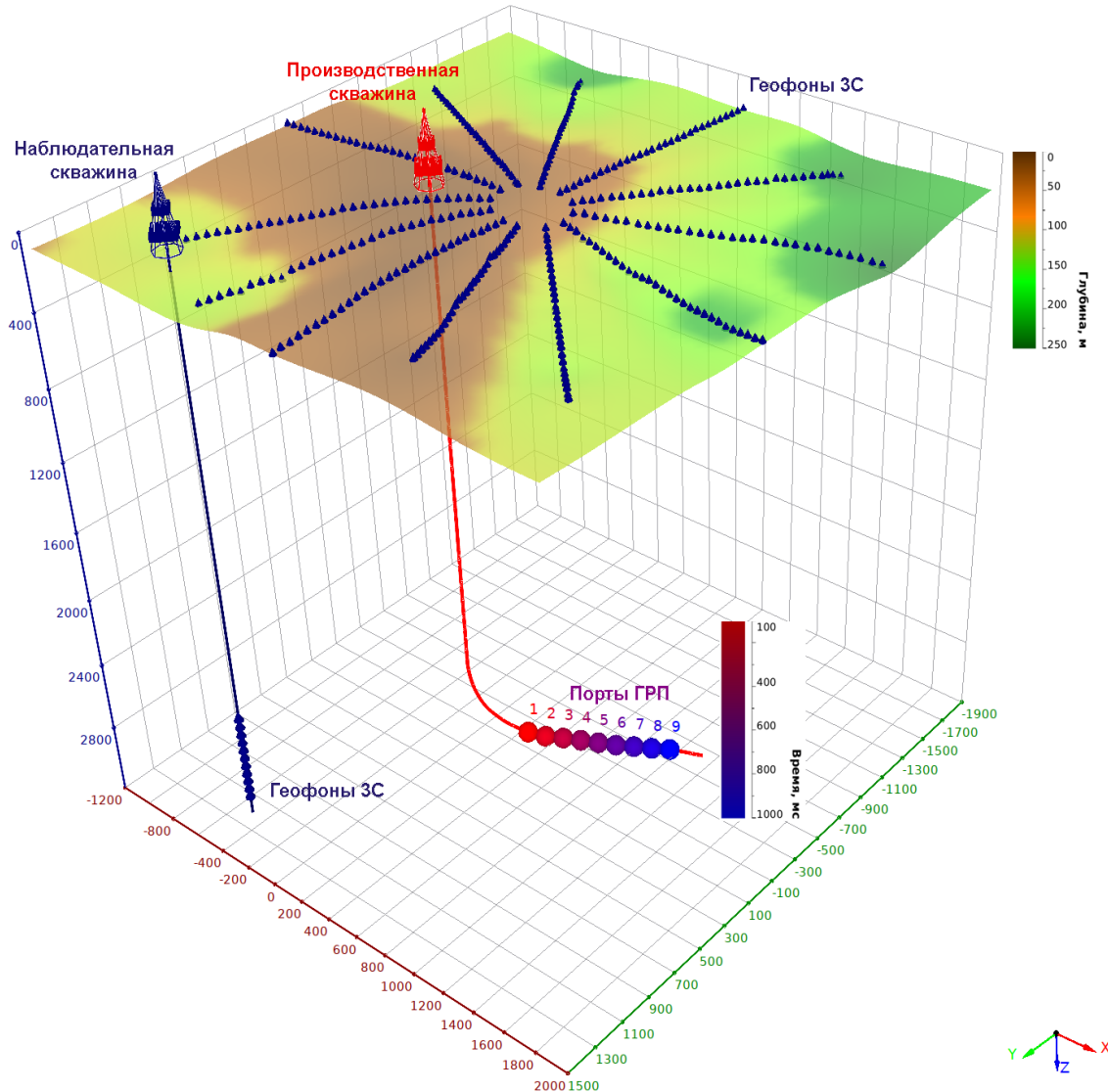


Актуальность и востребованность метода микросейсмического мониторинга для контроля образования трещин при гидроразрыве пласта (ГРП) в последние годы существенно возрастает. В то же время в России ощущается недостаток программного обеспечения для проектирования систем наблюдения при работах ГРП с целью выбора оптимальных параметров регистрации, а также для оценки достоверности результатов обработки и интерпретации.

Разработан программный пакет проектирования наземных и скважинных систем наблюдения для моделирования распространения сейсмических волн при образовании трещин, а также для локализации микротрещин с оценкой точности и помехоустойчивости определения гипоцентров микросейсмических событий.

Локализация микросейсмических событий, а также оценка точности и помехоустойчивости результатов проводится в автоматическом режиме с использованием интеллектуального робота «**АРИО** - **А**нализ данных, **Р**ешение, **И**сполнение решения и **О**ценка результата».

Программное обеспечение разработано на платформе «ЮНИВЕРС».





Наблюдения в скважине (модельный эксперимент)



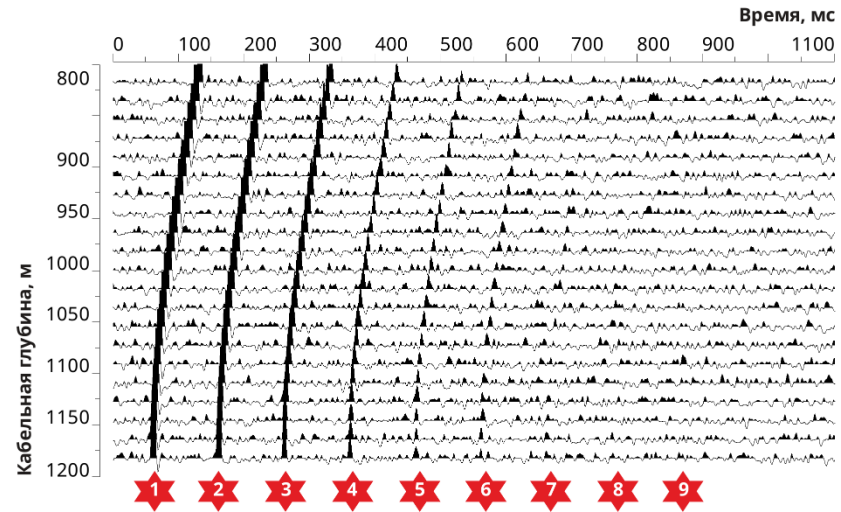
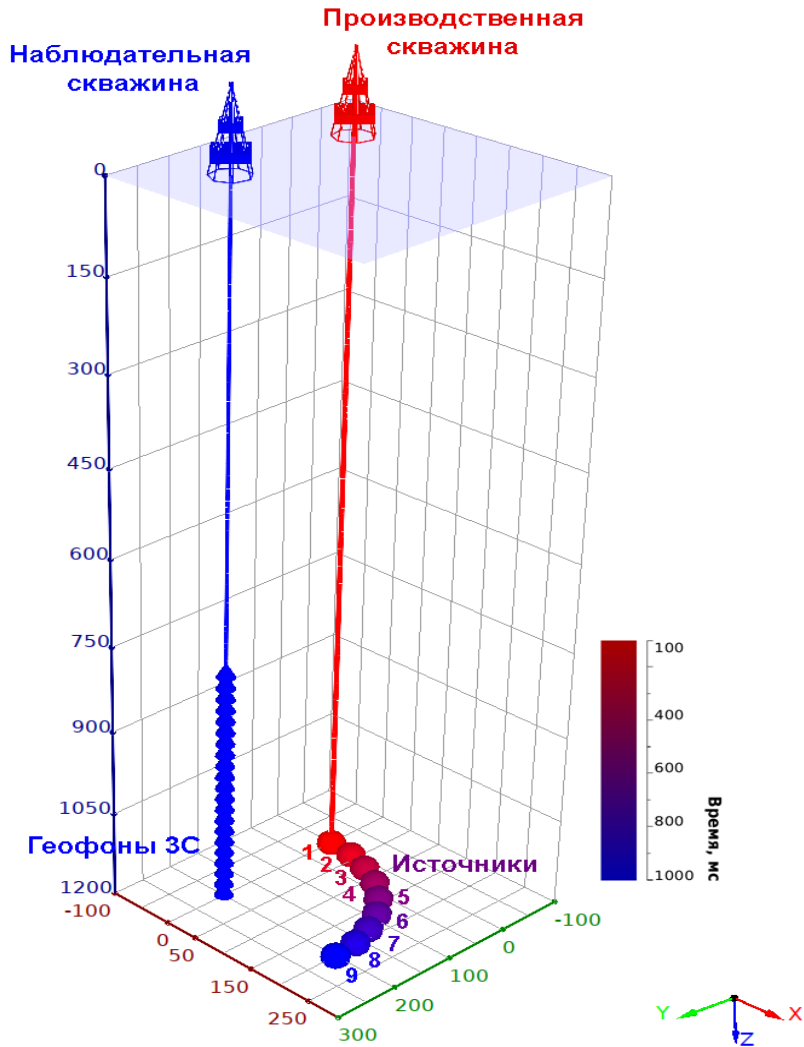
Спроектирована система наблюдения, состоящая из производственной скважины, в которой на глубине 1200 м моделируется последовательность источников, и вертикальной наблюдательной скважины, помещенной на удалении 200 м от производственной. Источники расположены в горизонтальной плоскости с равным шагом на окружности с центром в наблюдательной скважине.

Интенсивность источников в виде короткого одностороннего сигнала частотой 60 Гц уменьшалась в 2 раза на каждой из следующих 9 позиций со сгущением в районе отношения сигнал/шум, равного единице.

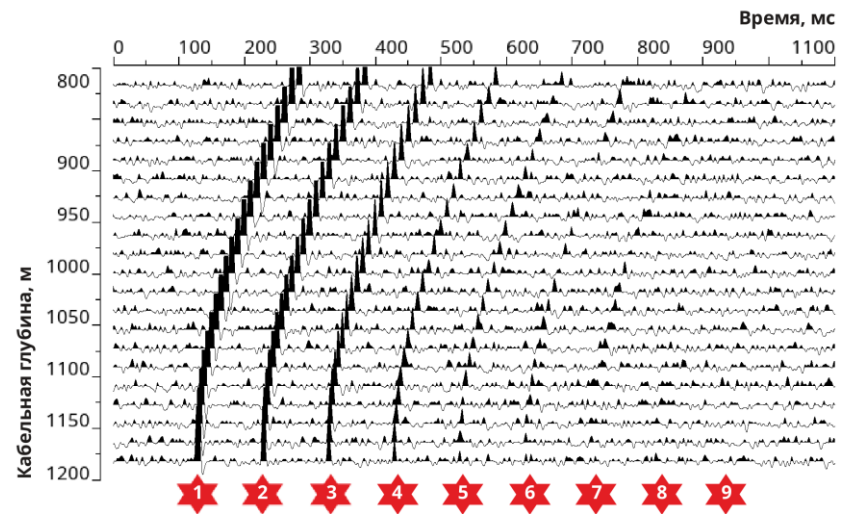
Центр приемной косы располагался на глубине 1000 м. Приемники распределялись равномерно на заданной базе.

Для изотропной среды с заданными постоянными скоростями продольных ($V_P=3600$ м/с) и поперечных ($V_S=1600$ м/с) волн рассчитывались векторные волновые поля для пространственных баз с различной апертурой (60° , 45° , 20°) и при различном количестве сейсмоприемников в наблюдательной скважине (5, 11, 21 точка).

Наблюдения в скважине (модельный эксперимент)



Продольные
волны



Поперечные
волны

№ события	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сигнал/шум	10	5	2.5	1.25	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1



Интеллектуальным роботом АРИО рассчитаны поля вероятностей локализации микросейсмического события от первой точки возбуждения (сигнал/шум=10) в трех ортогональных плоскостях. Событие зарегистрировано 21-точечным зондом на базе 400 м (апертура 60^0).

Из полей вероятностей видно, что:

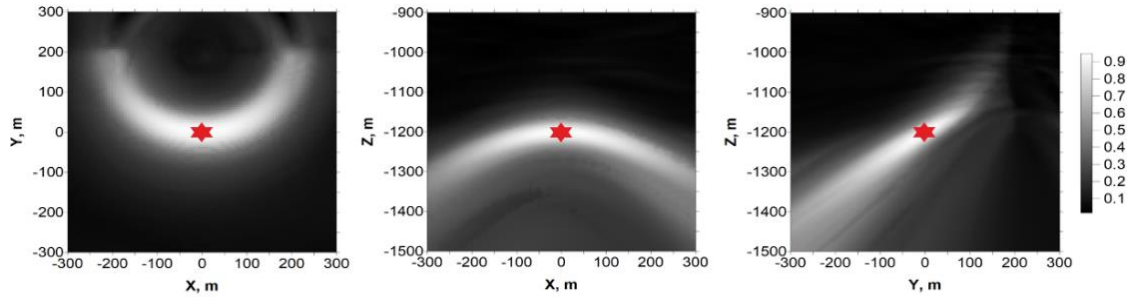
- неопределенность в азимутальном направлении больше, чем в радиальном;
- неопределенность для поперечных волн меньше, чем для продольных;
- имеет место существенное уточнение локализации события при совместном учете продольных и поперечных волн.

Степень выразительности локализованного события можно оценить по величине энтропии, рассчитанной по полю вероятностей. При низких значениях энтропии событие локализуется однозначно и устойчиво. При значениях, близких к 1, локализация невозможна (полная неопределенность).

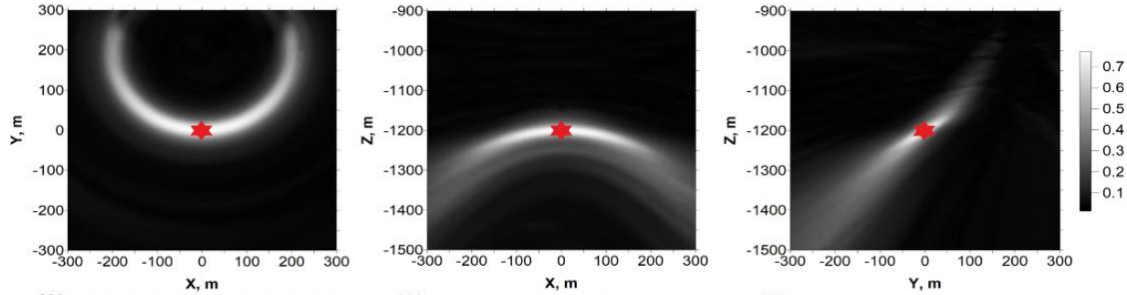
Для каждого из девяти заданных источников с регистрацией 21-точечным зондом на пространственной базе 400 м (продольные и поперечные волны совместно) рассчитана энтропия соответствующего поля вероятностей. Из графика видно, что для первых 7-ми событий (сигнал/шум ≥ 0.4) энтропия претерпевает относительно малые вариации, а для 8-го и 9-го события с отношениями сигнала к шуму 0.2 и 0.1 соответственно, резко возрастает.

Поля вероятностей, 21-точечный зонд, база 400 м

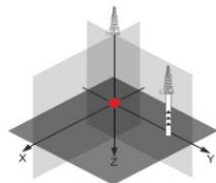
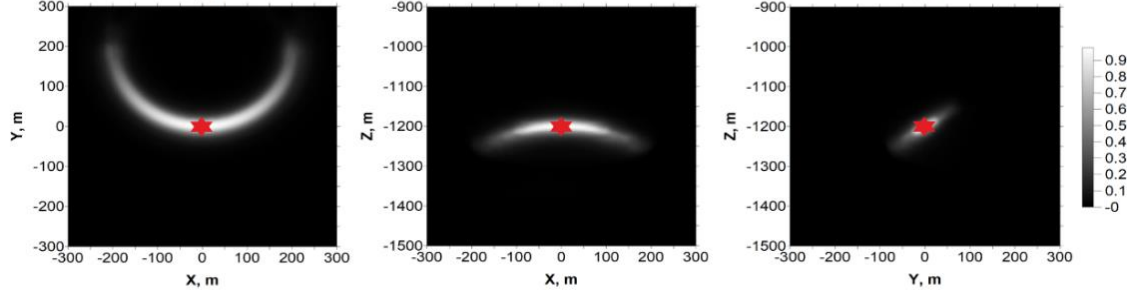
Продольные волны



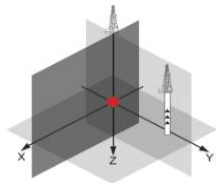
Поперечные волны



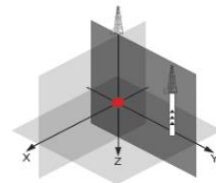
Продольные и поперечные волны совместно



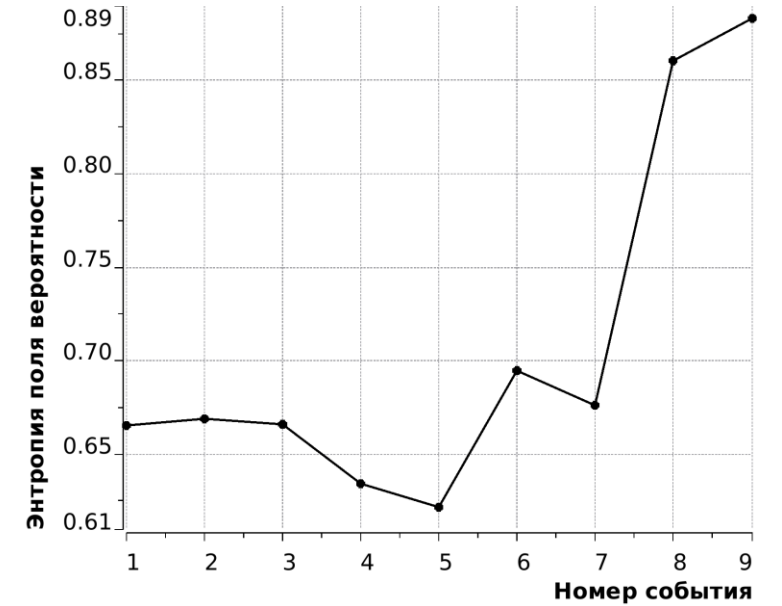
Плоскость XY



Плоскость XZ



Плоскость YZ



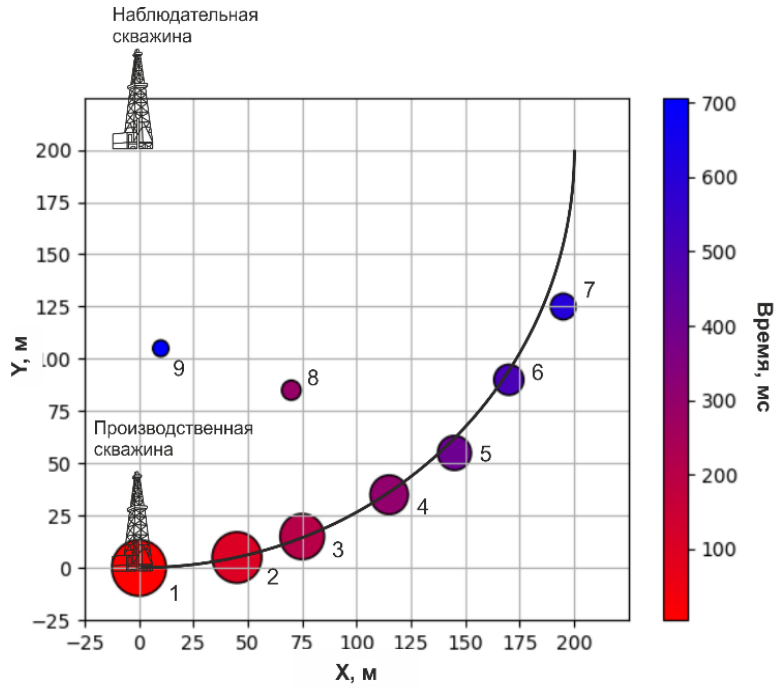
№ события	Сигнал/шум
1	10
2	5
3	2.5
4	1.25
5	0.8
6	0.6
7	0.4
8	0.2
9	0.1



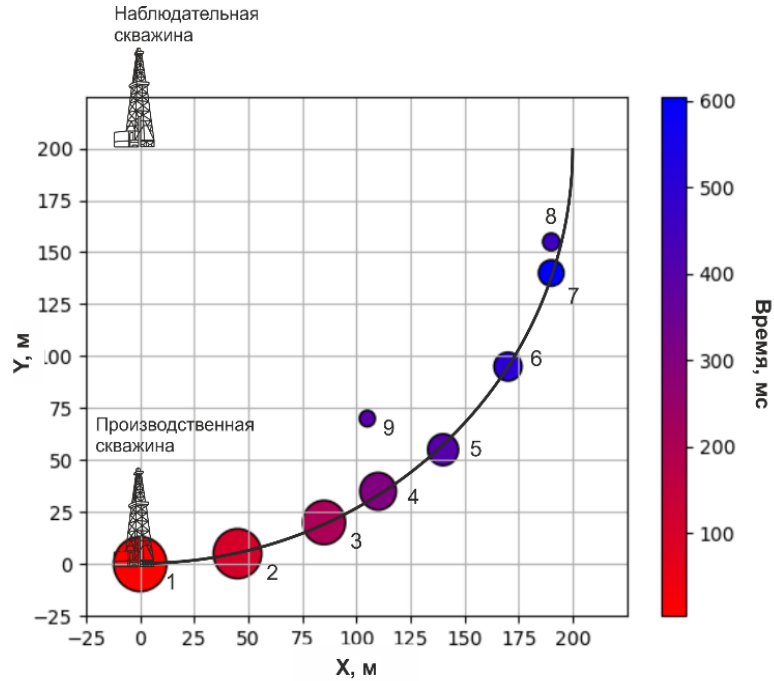
Ниже представлены изображения точек предполагаемой локализации всех девяти событий с уменьшающимся отношением сигнал/шум. Из рисунка видно, что:

- практически точная локализация достигается даже для отношения сигнал/шум, равного 0.2, хотя событие совершенно не обнаруживается в волновом поле;
- локализация событий по расстоянию от приемной установки практически точная, тогда как имеют место небольшие азимутальные отклонения.

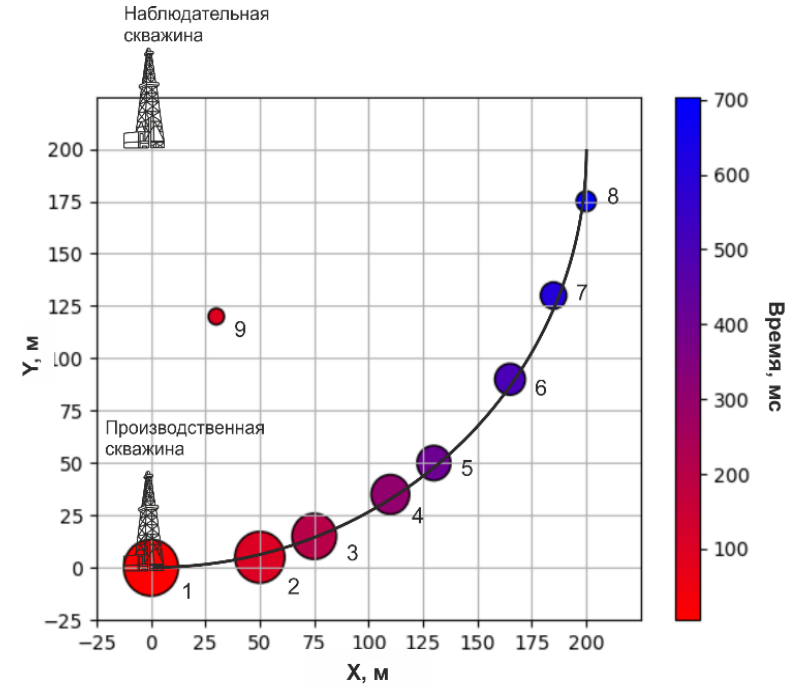
Локализованные микросейсмические события, 21-точечный зонд, база 400 м



Продольные волны



Поперечные волны



Продольные и поперечные волны
совместно

№ события	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сигнал/шум	10	5	2.5	1.25	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1



Отклонения рассчитанных положений центров микросейсмических событий от заданных

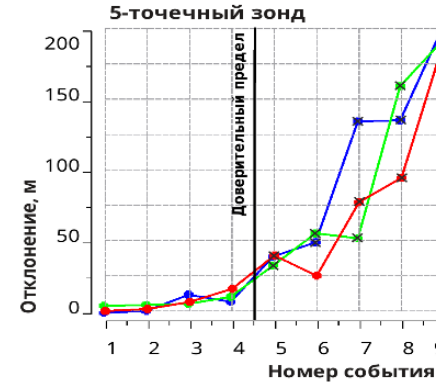
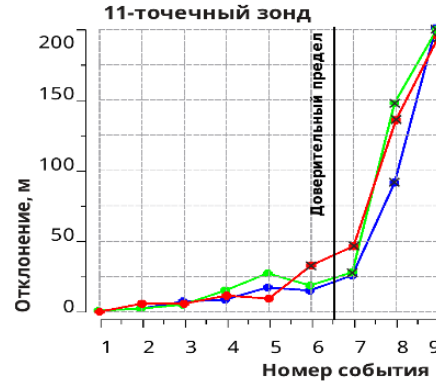
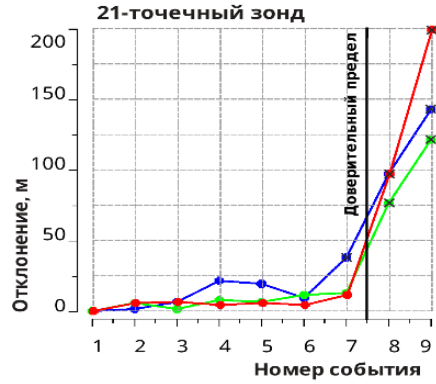


Ниже показаны осредненные по 10 различным реализациям белого шума отклонения оцененных роботом АРИО координат событий от заданных для продольных и поперечных волн, а также совместно.

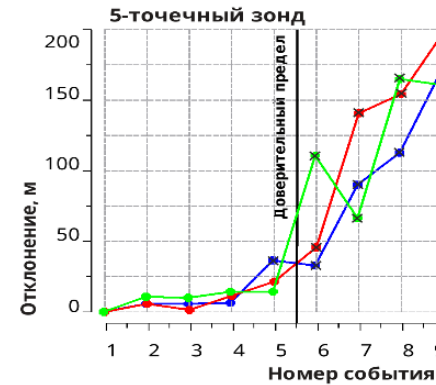
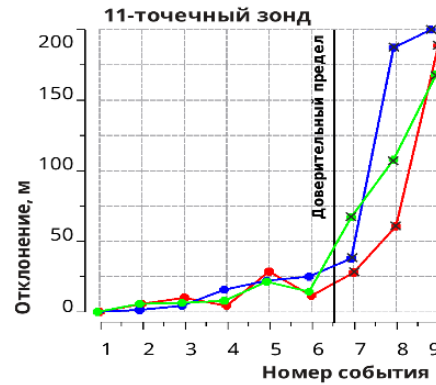
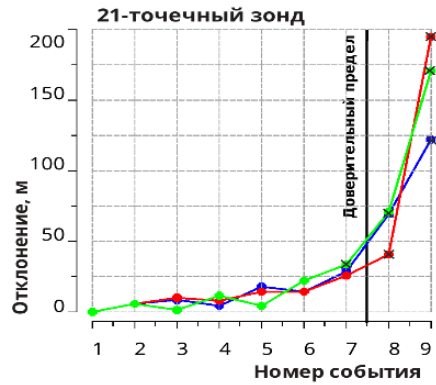
Как условно недостоверные отмечены оценки с отклонениями более 25 м.

Отклонения рассчитанных положений центров микросейсмических событий от заданных

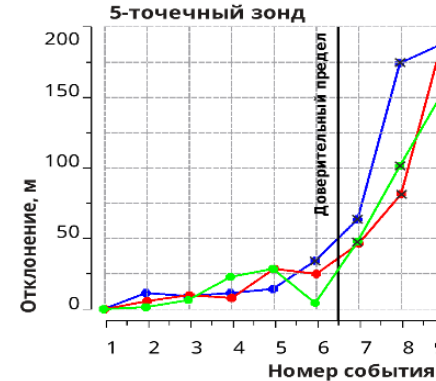
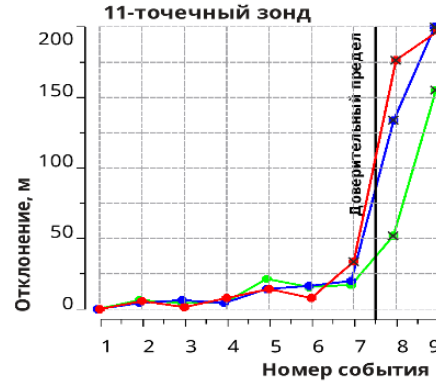
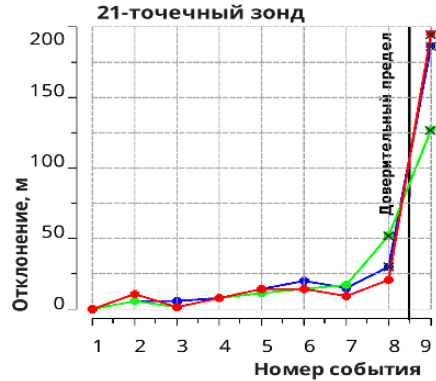
Продольные волны



Поперечные волны



Продольные и поперечные волны совместно



№ события	Сигнал/шум
1	10
2	5
3	2.5
4	1.25
5	0.8
6	0.6
7	0.4
8	0.2
9	0.1

X - недостоверные наблюдения





Наблюдения на поверхности (модельный эксперимент)

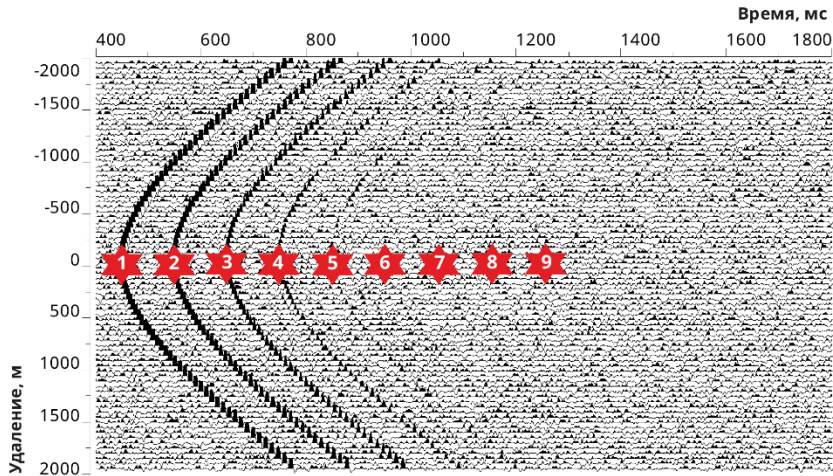
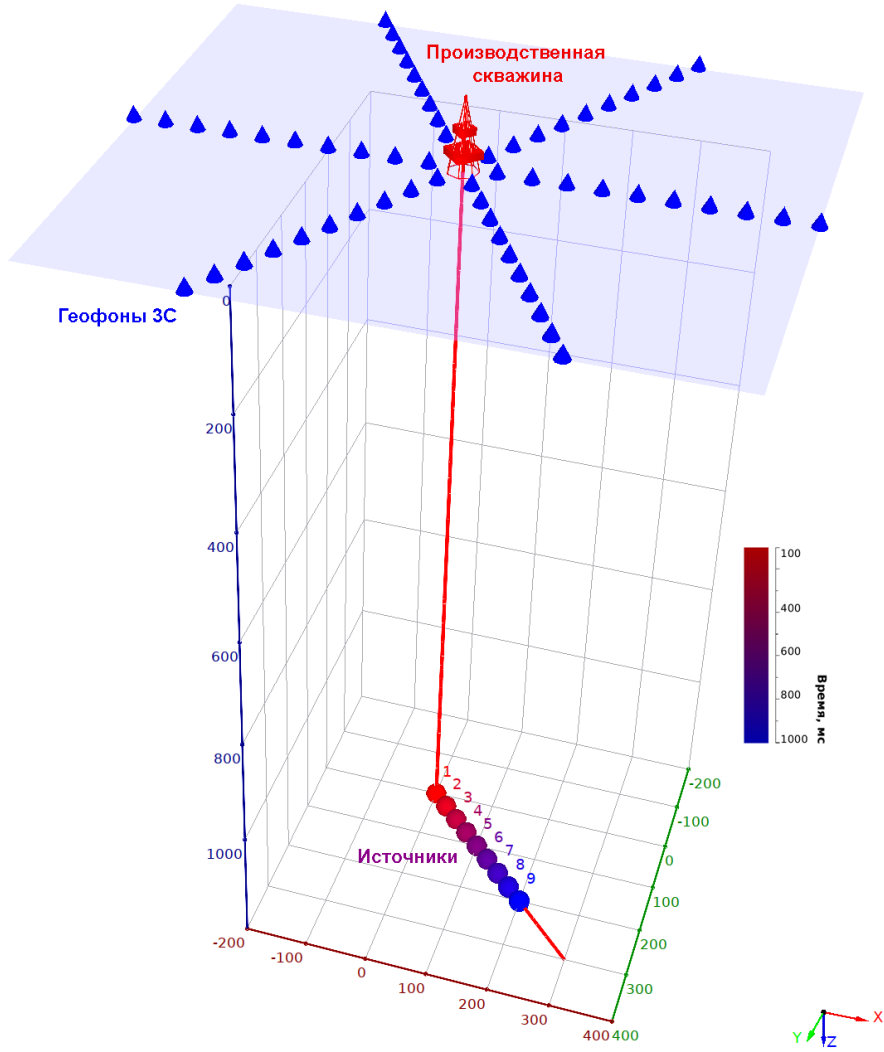
Спроектирована система наблюдения, состоящая из:

- производственной скважины, в которой на глубине 1200 м моделируется последовательность из 9-ти источников, расположенных на прямой линии, начинающейся на скважине;
- приемной расстановки, состоящей из трех лучей на поверхности под 120° с центром в устье производственной скважины.

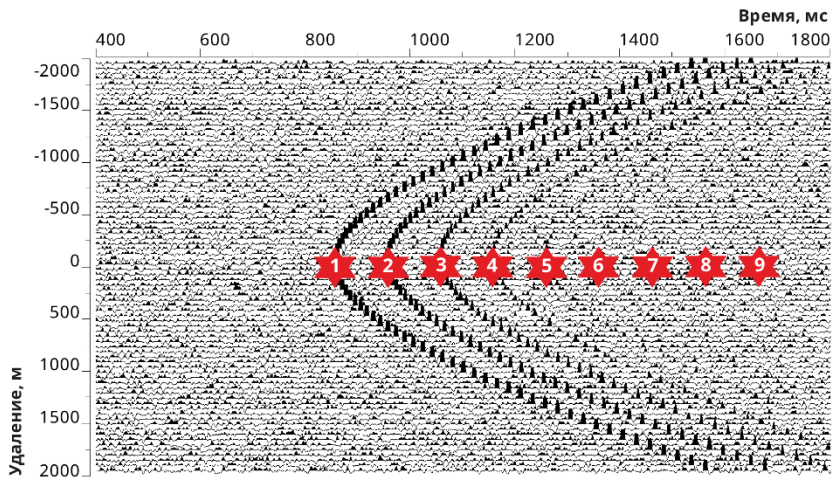
Интенсивность источников в виде короткого одностороннего сигнала частотой 60 Гц уменьшалась в 2 раза на каждой из следующих 9-ти позиций со сгущением в районе отношения сигнал/шум, равного единице.

Для изотропной среды с заданными постоянными скоростями продольных ($V_P=3600$ м/с) и поперечных ($V_S=1600$ м/с) волн рассчитывались векторные модельные волновые поля для пространственных баз с различной апертурой (120° , 80° , 45°) и при различном количестве сейсмоприемников на поверхности (60, 120, 240 штук).

Наблюдения на поверхности (модельный эксперимент)



Продольные
волны



Поперечные
волны

№ события	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сигнал/шум	5	2.5	1.25	0.63	0.31	0.16	0.08	0.04	0.02



Наблюдения на поверхности (модельный эксперимент)

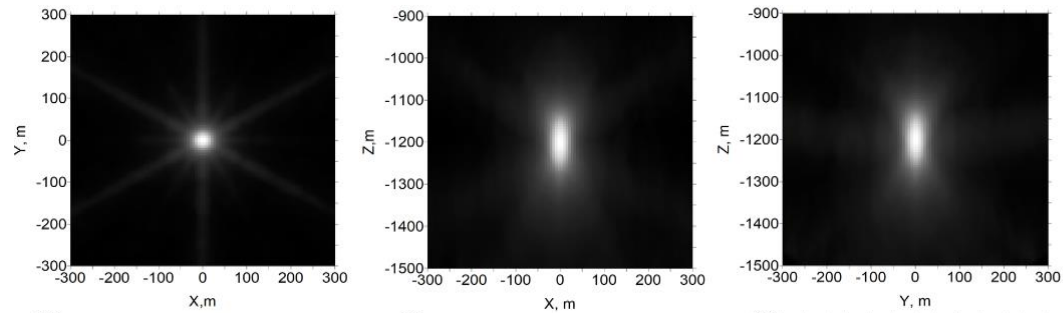


Поля вероятностей для первого события (сигнал/шум=5) хорошо концентрируются вблизи точки образования, но незначительно растянуты по вертикали. Локализация улучшается для продольных и поперечных волн совместно.

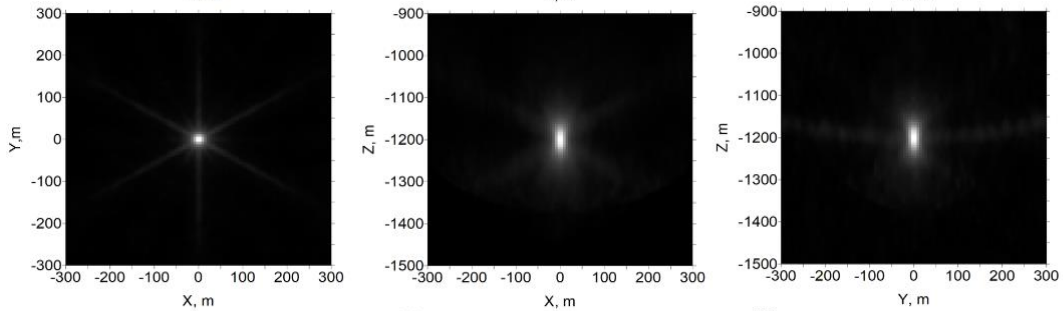
Из графика энтропии видно, что для первых 6-ти событий (сигнал/шум ≥ 0.16) энтропия претерпевает относительно малые вариации, а для 7-го, 8-го и 9-го события с отношениями сигнала к шуму 0.08, 0.04 и 0.02 соответственно, резко возрастает.

Поля вероятностей, 240 сейсмоприемников, апертура 120°

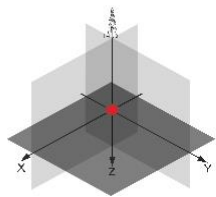
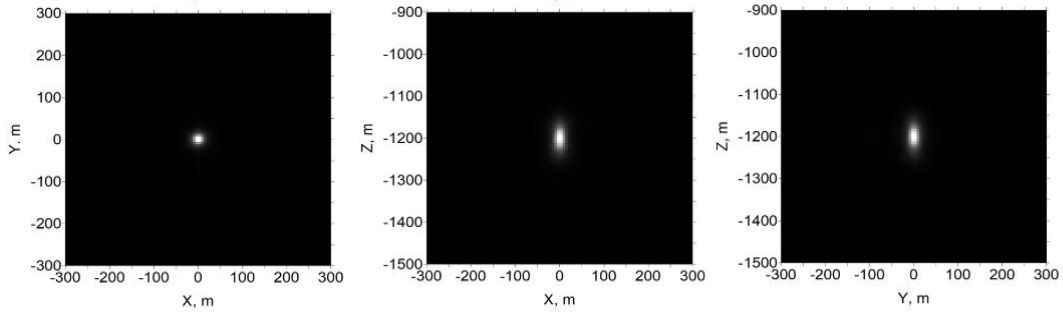
Продольные
волны



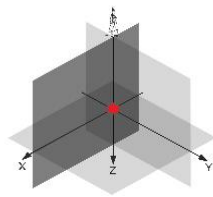
Поперечные
волны



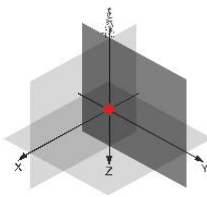
Продольные и
поперечные
волны
совместно



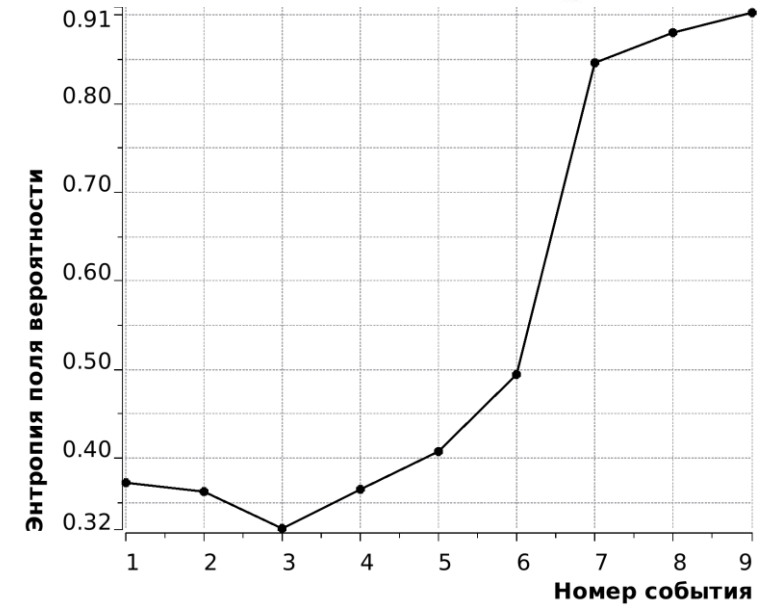
Плоскость XY



Плоскость XZ



Плоскость YZ



№ события	Сигнал/шум
1	5
2	2.5
3	1.25
4	0.63
5	0.31
6	0.16
7	0.08
8	0.04
9	0.02



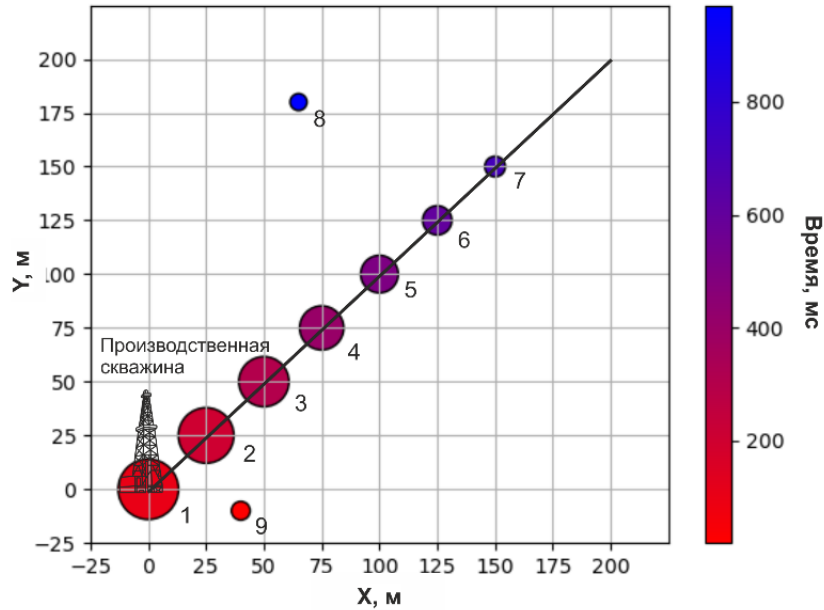
Локализованные микросейсмические события



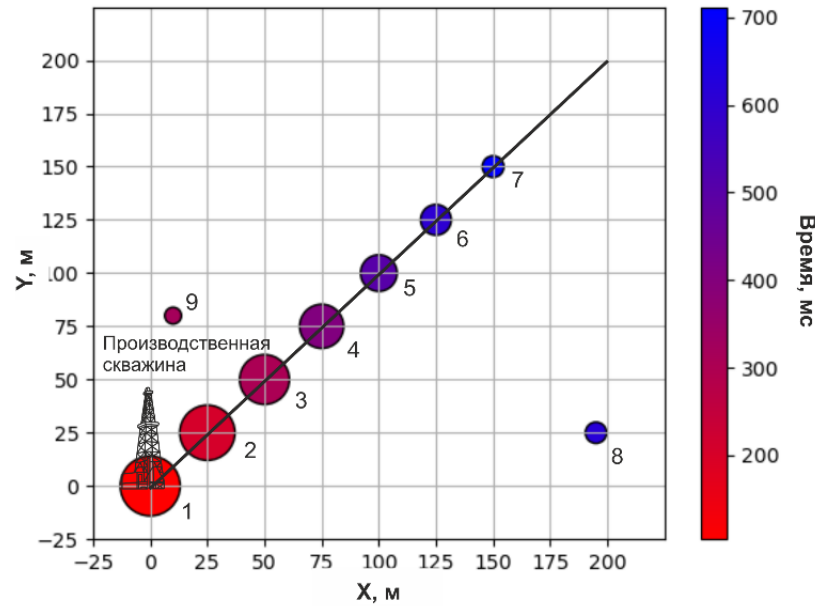
Изображения точек предполагаемой локализации всех девяти событий с уменьшающимся отношением сигнал/шум показывает, что:

- точная локализация достигается для отношения сигнал/шум, равного 0.08, хотя событие совершенно не обнаруживается в волновом поле;

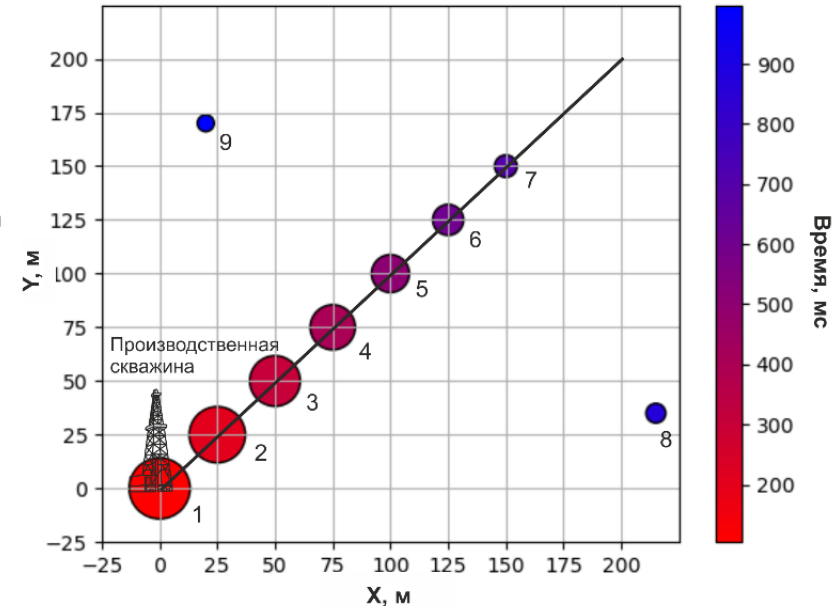
Локализованные микросейсмические события, 240 сейсмоприемников, апертура 120°



Продольные волны



Поперечные волны



Продольные и поперечные волны
совместно

№ события	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сигнал/шум	5	2.5	1.25	0.63	0.31	0.16	0.08	0.04	0.02



Отклонения рассчитанных положений центров микросейсмических событий от заданных

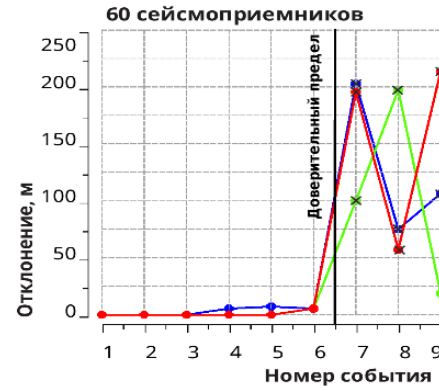
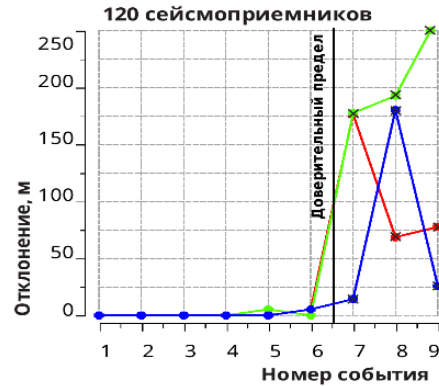
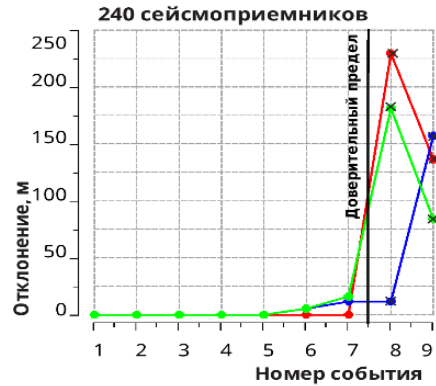


Ниже показаны осредненные по 10 различным реализациям белого шума отклонения оцененных роботом АРИО координат событий от заданных для продольных и поперечных волн, а также совместно.

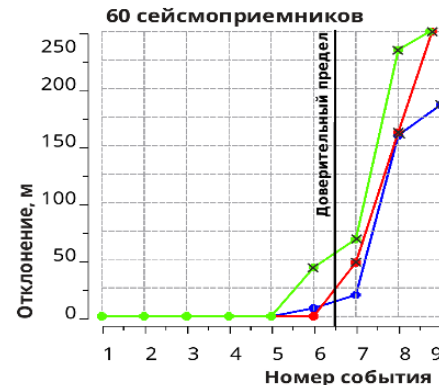
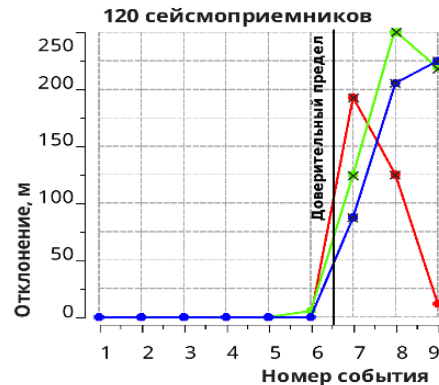
Как условно недостоверные отмечены оценки с отклонениями более 25 м.

Отклонения рассчитанных положений центров микросейсмических событий от заданных

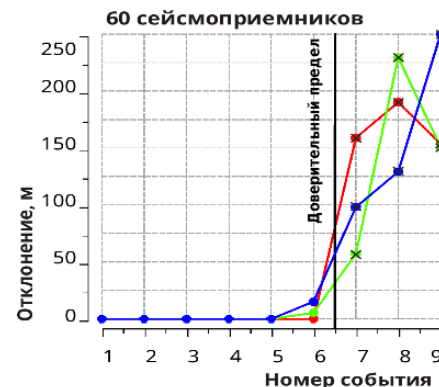
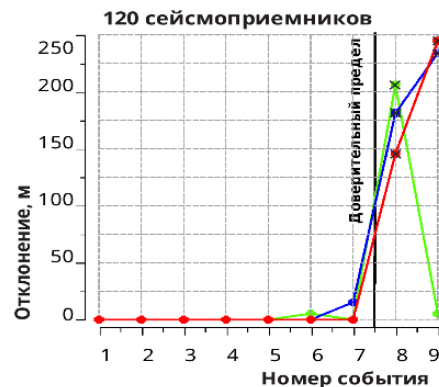
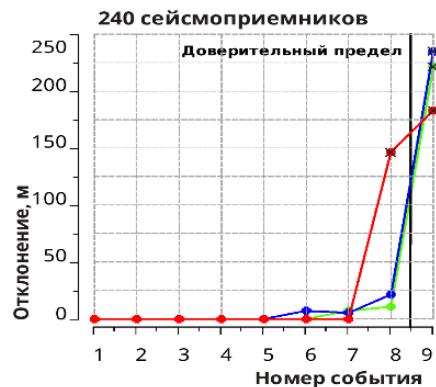
Продольные волны



Поперечные волны



Продольные и поперечные волны совместно



№ события	Сигнал/шум
1	5
2	2.5
3	1.25
4	0.63
5	0.31
6	0.16
7	0.08
8	0.04
9	0.02

× - недостоверные наблюдения





Результаты



1. Разработана интерактивная технология для проектирования наземных и скважинных систем наблюдения в задачах контроля гидроразрыва пласта с возможностью автоматической локализации микросейсмической активности с оценкой точности и помехоустойчивости результата.
2. Разработанная технология применена для модельной оценки точности и помехоустойчивости локализации событий при ГРП при наблюдениях в скважине и на поверхности с различным количеством сейсмоприемников и различной апертурой наблюдений.
3. Точность и помехоустойчивость интеллектуального робота АРИО исследована на тестовых материалах.
4. Показано, что для скважинных наблюдений с 21-точечным зондом на базе 400 м практически точная локализация достигается при отношении сигнала к шуму 0.2. Для наблюдений на поверхности при совместном использовании продольных и поперечных волн погрешность до 25 м достигается для 240 датчиков при с/ш до 0.04, для 120 датчиков при с/ш 0.08 и для 60 датчиков при с/ш 0.16.



Выводы



1. Обеспечивается высокая точность автоматического обнаружения и локализации событий при хорошей помехоустойчивости. Это открывает возможность наблюдения за образованием трещин в реальном времени.
2. При скважинных наблюдениях обеспечивается более высокая точность локализации по удалению и меньшая по азимуту.
3. Точность и помехоустойчивость возрастает при совместном использовании продольных и поперечных волн. Последние, из-за большой кривизны, обеспечивают более точную локализацию в пространстве вероятностей.
4. Увеличение количества точек наблюдения приводит практически к линейному повышению помехоустойчивости.



Рекомендации

1. Рекомендуется использование разработанной технологии для контроля корректности обработки и интерпретации данных сейсмомониторинга.
2. В связи с выявленной в процессе эксперимента высокой точностью и помехоустойчивостью локализации объектов, превышающей мировые аналоги, рекомендуется применять представленную технологию при обработке реальных данных.

<http://geovers.com>