

Д.Л. Зайцев, В.М. Брыксин, К.С. Белотелов, Ю.И. Компаниец,
Р.Н. Яковлев

АЛГОРИТМЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КЛАССИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ И АЗИМУТА ДО ПУНКТА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Зайцев Д.Л., Брыксин В.М., Белотелов К.С., Компаниец Ю.И., Яковлев Р.Н. Алгоритмы и измерительный комплекс классификации источников сейсмических сигналов, определения расстояния и азимута до пункта возбуждения поверхностных волн.

Аннотация. Методы машинного обучения и цифровой обработки сигналов применяются в различных отраслях, в том числе при анализе и классификации сейсмических сигналов поверхностных источников. Разработанный алгоритм анализа типов волн позволяет автоматически идентифицировать и, соответственно, отделять приходящие сейсмические волны на основе их характеристик. Для выделения типов волн используется сейсмический измерительный комплекс, определяющий характеристики граничных волн поверхностных источников с использованием специальных молекулярно-электронных датчиков угловых и линейных колебаний. Представлены результаты работы алгоритма обработки данных, получаемых по методике сейсмических наблюдений, использующей спектральный анализ на основе вейвлета Морле. Также в работе описан алгоритм классификации источников сигнала, определения расстояния и азимута до пункта возбуждения поверхностных волн, рассмотрено использование статистических характеристик и MFCC (Мел-частотные кепстральные коэффициенты) параметров, а также их совместное применение. При этом в качестве статистических характеристик сигнала были использованы следующие: дисперсия, коэффициент эксцесса, энтропия и среднее значение, а в качестве метода машинного обучения был выбран градиентный бустинг; в качестве метода определения расстояния до источника сигнала применен метод машинного обучения на основе градиентного бустинга с применением статистических и MFCC параметров. Обучение проводилось на тестовых данных на основе выделенных особенных параметрах сигналов источников сейсмического возбуждения поверхностных волн. С практической точки зрения, новые методы сейсмических наблюдений и анализа граничных волн позволяют решить проблему обеспечения плотной расстановки датчиков в труднодоступных местах, устранить недостаток знаний в алгоритмах обработки данных сейсмических сенсоров угловых движений, выполнить классификацию и систематизацию источников, повысить точность прогнозирования, реализовать алгоритмы локации и сопровождения источников. Целью работы стало создание алгоритмов обработки сейсмических данных для классификации источников сигнала, определения расстояния и азимута до пункта возбуждения поверхностных волн.

Ключевые слова: граничные волны, молекулярная электроника, вейвлет анализ, машинное обучение, определение азимута, определение расстояния, алгоритм обработки данных.

1. Введение. В последние годы много внимания уделяется достижениям в области вращательной сейсмологии [1]. Большинство исследователей сходятся во мнении, что природа, свойства, прогнозные модели и классификация поверхностных источников

сейсмического сигнала могут и должны изучаться за счет всестороннего анализа и расширения моделей распространения поверхностных волн. В работе [2] было показано, что возможно рассчитать дисперсионные кривые для волн Лява, используя амплитудные соотношения для поперечного ускорения и вертикальной скорости вращения, при условии достаточно высокого соотношения сигнал/шум в записанных сигналах. В работе [3] показывается, что с помощью теоретических соотношений между линейными и вращательными движениями для волн Рэлея и Лява в приповерхностной среде, можно получить направление распространения волн, а также фазовые и волновые скорости, используя только одну станцию. Это обстоятельство становится особенно актуально в труднодоступных местах, где сложно обеспечить плотную расстановку датчиков. В тоже время одновременное измерение параметров волнового поля и их пространственных градиентов в одной точке приема позволяет эффективно повысить разрешение. Так, например, в исследовании [4] показано, что, явно используя записи с вращательных датчиков, и пользуясь вычисленным потоком энергии и преобразованием Хоффа можно улучшить точность локализации сигнала. В работе [5] были разработаны фильтры на основе пространственного градиента, позволяющие разделить приходящие волны на восходящие/нисходящие и на P/S составляющие. В работе [6] были предложены 6-компонентные поляризационные модели для всех типов волн, и был предложен алгоритм, который позволяет автоматически идентифицировать и, соответственно, разделять приходящие волны на основе их поляризационных характеристик. Для выделения типов волн часто используется алгоритм MUSIC (Multiple Signal Classification). Этот алгоритм был разработан для получения спектра зашумленного сигнала на основе разбиения его на пространство сигнала и пространство шумов, с помощью матрицы когерентности [7]. Для решения задач с помощью таких алгоритмов вычисляют собственные значения и собственные вектора матрицы. Ненулевым собственным значениям соответствуют реальные сигналы, затем подбираются наиболее подходящие поляризационные параметры и, исходя из этого, определяются тип волны, а также ее характеристики.

Изучение поверхностных сейсмических эффектов особенно широко применяется в области мониторинга зданий и сооружений, которые вызывают появление поверхностных сейсмических волн благодаря ветру, оседанию конструкций, сдвиговым движениям почвы и так далее. Благодаря взаимодействию грунт-структура здание преобразует энергию падающей волны (например, ветра) во

вращательные движения фундамента и окружающего грунта. Таким образом, здание выступает в качестве источника вращательных поверхностных волн. В густонаселенных мегаполисах, где расстояние между соседними зданиями невелико, происходит взаимодействие здания с грунтом и обратно. В таком случае, а также в случае, длинных мостов с несколькими опорами, требуется детальный двух- и трехмерный анализ для описания сложной генерации вращательного отклика и вращений в грунте [8]. Натурные эксперименты по взаимодействию грунта и сооружений дали данные для измерения и количественной оценки характера вращательных движений на границе раздела грунта и фундаментов зданий. Однако при отсутствии зарегистрированных сильных вращательных движений в ближнем поле инженерные исследования должны использовать численное моделирование для оценки и расчета вклада вращательных движений в отклик сооружений. Например, в [9] показано, что спектральные амплитуды псевдо-относительной скорости возбуждения горизонтальными, вертикальными и вращательными движениями грунта могут быть представлены суперпозицией трех математических величин. Этот новый результат подчеркивает важность вращательного возбуждения грунта и необходимость включения его в оценки отклика при проектировании очень высоких зданий [10]. В другом исследовании [11] численными методами моделируется распространение сейсмических волн через структуру и деформации ее элементов за пределами линейного диапазона отклика. Продемонстрировано как создание зон нелинейного отклика и их локализация («пластические шарниры») приводят к возникновению зон больших локальных вращений. Размещением на балках и колоннах малоапертурных матриц преобразователей вращения было продемонстрировано, достижение нового уровня разрешения точечных деформаций, благодаря тому, что с близко расположенных датчиков вращения можно регистрировать кривизну в заданной точке [12]. Таким образом, массовые измерения вращательных движений в важных конструкциях позволяют надежно отслеживать состояние конструкций в режиме реального времени.

Другим значимым направлением, широко освещенным в литературе последнего времени, по теме поверхностных источников, их классификации и изучения являются системы обнаружения нарушителей для нужд систем охраны и пр. В частности, во многих исследованиях обсуждается задача определения направления на объект, являющийся источником поверхностных сейсмических возмущений. Традиционное решение этой задачи заключается в

использовании в качестве источника исходных данных сигналов вертикальных сейсмоприемников. Определение координат источника происходит путем изучения данных с нескольких разнесенных в пространстве датчиков, регистрирующих изучаемое сейсмическое возмущение. При этом приемники располагаются по заданной схеме, например по периметру или зигзагом [13]. Алгоритмы выявления азимута источника сейсмосигнала, как правило, строятся на определении задержки времени достижения сейсмического сигнала приемников. Для более точного определения направления на сейсмический источник поверхностных волн применяют увеличение частоты опроса при анализе [14].

Перспективной приборной базой для регистрации граничных сейсмических волн от поверхностных источников являются электрохимические датчики угловых колебаний. Интерес к практическому использованию сейсмических датчиков угловых колебаний в физике значительно вырос в последние 10 лет благодаря теоретическим и экспериментальным исследованиям [15–17]. В указанных работах обсуждаются новые возможности для геофизических исследований, которые открываются благодаря применению датчиков угловых колебаний. В частности, можно считать экспериментально установленным факт, что использование датчиков угловых колебаний позволяет эффективно определять градиент сейсмического поля и за счет этого сокращать количество точек наблюдения при сохранении качества данных [18], а также исключать пространственный алиасинг при недостаточной плотности расстановки.

Перспективы молекулярно-электронных датчиков вращательных движений и линейного вертикального датчика для анализа источников поверхностных волн для примера охранных систем показаны в работе [19]. В данной работе демонстрируется принципиально отличный от существующих подход в измерении направления на поверхностный источник сейсмических возмущений. Для решения задачи используется один многокомпонентный сейсмический модуль, все измерительные компоненты которого сосредоточены в одном корпусе. Определение направления при таком подходе основывается не на измерении разности времен прихода волны на разнесённые датчики, а на сопоставлении амплитуд и фаз сигналов на разных компонентах одного модуля. При этом нет необходимости увеличивать частоту дискретизации сигнала при обработке. В результате энергопотребление такой системы, а следовательно, и автономность её работы оказываются ниже, чем у

традиционных разнесенных систем аналогичного назначения. В работах [20, 21] показана возможность совместного использования датчиков линейных и угловых колебаний для повышения точности определения положения источников сигналов при микросейсмических исследованиях. В работах [22–24] экспериментально показано селективно более высокая чувствительность датчиков угловых колебаний по отношению к волнам, распространяющимся вдоль границ. Обозначенное свойство использовалось для фильтрации поверхностных волн, которые рассматривались как шумы измерений. В настоящей работе граничные волны являются целевыми, и селективность датчиков угловых движений к волнам такого типа является средством увеличения соотношения сигнал/шум для измерения параметров этих волн.

Датчики угловых колебаний активно встречаются и в патентных исследованиях. В частности, способность датчиков угловых колебаний проводить разделение продольных и поперечных волн в сейсмическом сигнале, а также провести дифференциацию между различными видами интерфейсных волн, в зависимости от характера их поляризации (ориентация эллипса поляризации и степень эллиптичности) используется в патентах [25–27], выданных и поддерживаемых Шлюмберже. Отметим, что большинство полевых исследований, выполнено с применением электрохимических датчиков угловых колебаний, на основе молекулярно-электронной технологии. Среди последних исследований параметров измерителей угловых волновых полей можно отметить работы [28, 29], в которых подробно исследуются механизмы собственных шумов чувствительных элементов. В то же время, как было сказано ранее, совместное использование низкочастотных датчиков линейных и угловых движений позволяет получить наиболее полную картину волнового поля возмущений поверхностных источников сигнала. В этом аспекте интересно проследить за последними достижениями в области разработки молекулярно-электронных датчиков линейных движений, отличающихся крайне высокой чувствительностью (при схожих габаритах), которые отражены в публикациях [30–34]. В целом, несмотря на успехи в развитии измерительной аппаратуры, алгоритмы обработки данных в настоящее время еще недостаточно проработаны, и в предлагаемой работе авторы исправляют указанный недостаток.

Таким образом, основными целями работы стали: разработка алгоритмов обработки данных, получаемых по методике сейсмических наблюдений с использованием датчиков для регистрации угловых и линейных колебаний в сейсмическом волновом поле поверхностных

источников, для классификации источников сигнала, определения расстояния и азимута до пункта возбуждения поверхностных волн; разработка измерительного комплекса для проведения экспериментальных исследований сейсмических событий на основе измерения характеристик граничных волн поверхностных источников с использованием специальных видов датчиков – молекулярно-электронных датчиков угловых и линейных колебаний, характеризующихся селективной способностью регистрировать сдвиговую компоненту волнового поля с высокой чувствительностью.

Применение новой технологии сейсмических наблюдений поверхностных источников возбуждений на граничных волнах с использованием электрохимических сейсмических датчиков угловых колебаний, позволяющей принципиально повысить качество и информативность данных, обуславливает новизну предлагаемого исследования. Впервые в работе применяются датчики такого типа для регистрации и детального изучения граничных сейсмических волн от поверхностных источников сигнала. Возможность прямой регистрации крайне малых угловых колебаний грунта в широком частотном и динамическом диапазонах позволила разработать новые, потенциально более эффективные методы проведения сейсмических измерений и обработки полученных данных, и прежде всего, при исследовании сигналов, созданных поверхностными источниками.

Непосредственным конкурентом исследованию можно рассматривать работы [35–37]. Так в [35], например, предложен альтернативный механизм оценки источника сигнала и скоростей распространения возмущений. Авторами применяется мультипликативный метод визуализации с обращением времени, основанный на несвязанных волновых полях. Условие мультипликативного отображения с обращением времени применяется к автоматическим и перекрестным корреляциям несвязанных волновых полей каждого приемника для построения окончательного изображения местоположения. Продемонстрировано, что численные эксперименты могут давать надежные изображения местоположения источника с четкой диаграммой направленности высокого разрешения. В [36] проиллюстрирована сейсмологическая ценность данных о вращательном движении грунта, на примере телесеismicкого землетрясения, зарегистрированного на многокомпонентной кольцевой лазерной обсерватории. Продемонстрировано то, как параметры волн (фазовая скорость, направление распространения и угол эллиптичности) и типы волн нескольких фаз могут быть автоматически оценены. В [37] сейсмическая была детально

проанализирована волна Релея с точки зрения параметров, определяющих форму ее математической записи, основанной на сходстве с записями, полученными во время вызванной сейсмичности при мониторинге ближнего поля шестикомпонентных измерений. При этом проведенные полевые измерения позволили соотнести количество излучаемой сейсмической энергии с ожидаемой наибольшей амплитудой вращательных колебаний во всем поле их воздействия. Это, в свою очередь, позволяет прогнозировать, согласно математической модели, расстояние до источника волн и их энергию.

2. Экспериментальная установка. Прототип измерительного комплекса для регистрации граничных сейсмических волн на основе молекулярно-электронных датчиков угловых и линейных колебаний состоит из сейсмического измерительного модуля, на основе 3 угловых и 3 линейных датчиков, помещенных в один корпус, автономной 6 канальной 24-битной системы сбора данных NDAS-8226 [38] и системы соединительных проводов (рисунок 1). При этом питание системы может осуществляться как от аккумуляторной батареи, так и от стационарного источника питания. Количество каналов позволяет вести одновременную запись всех бти компонент. Система оснащена высокоточным кварцевым генератором с привязкой к абсолютному времени с помощью GPS/GLONASS, что позволяет обеспечить точность синхронизации выше, чем стандартная погрешность по времени в 1 мкс. В таблице 1 приведены основные характеристики прототипа сейсмического измерительного комплекса.

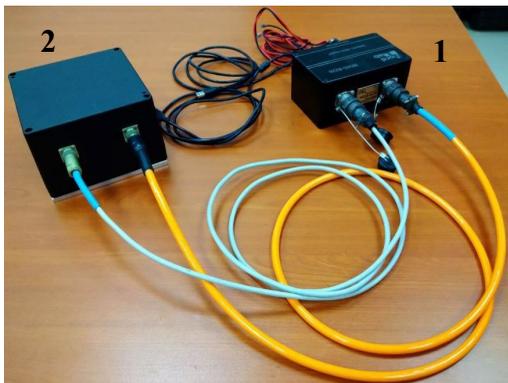


Рис. 1. Прототип измерительного комплекса для регистрации граничных сейсмических волн на основе датчиков угловых и линейных колебаний. Состоит из системы сбора данных NDAS-8226 – 1 и сейсмического измерительного модуля – 2

Таблица 1. Основные характеристики прототипа измерительного модуля

Наименование характеристики	Значение для линейных компонент	Значение для угловых компонент
Рабочий частотный диапазон по уровню на границах -3 дБ	1-300 Гц	1-150 Гц
Коэффициент чувствительности	250 В/м/с	50 В/рад/с
Неравномерность в рабочем частотном диапазоне	+1 дБ	+1 дБ
Номинальное энергопотребление на компоненту	15 мА	15 мА
Уровень собственных шумов	-100 дБ, -120 дБ (<10 Гц)	-100 дБ, -120 дБ (<10 Гц)

При проведении эксперимента предварительно размеченном поле были проведены записи сигнала с проходом человека по определенным траекториям. Выбранные расстояния не специфичны и были установлены таковыми, исходя из возможностей экспериментальной площадки. Вместе с тем выбранные размеры полигона неплохо соответствуют приемлемым расстояниям достаточной чувствительности применяемых сенсоров для исследуемых задач. Полигон представлял собой плотный грунт, испытатель (пешеход массой 70 кг) совершал движение по заданным траекториям со скоростью 4-6 км/ч. Контрольные точки и траектории движения для экспериментов были заранее размечены. В контрольных точках, обозначенных на рисунке окружностями, испытатель совершает прыжок, данное действие позволяет проконтролировать этапы выполнения эксперимента. Данный набор экспериментов был выбран с целью получения обширного набора азимутов и расстояний до измерительного модуля.

Схемы экспериментов изображены на рисунках 2–4 с указанием принятых для дальнейшего описания обозначений.

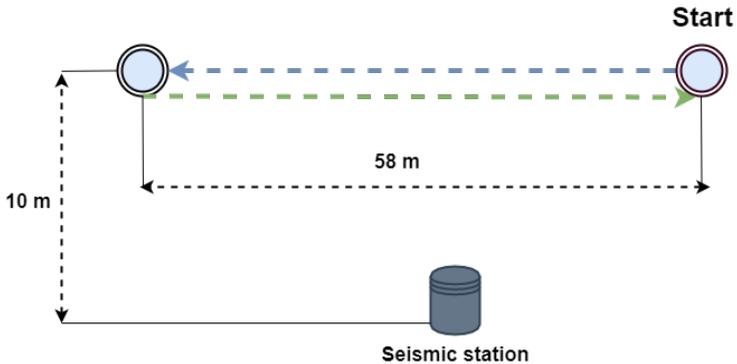


Рис. 2. Схема прохода для экспериментов А и В. Испытатель проходит по линии вдоль измерительного модуля. В эксперименте А испытатель от точки старта, а в эксперименте В к точке старта. Расстояние между точками – 58 метров, расстояние между измерительным модулем и траекторией движения – 10 метров

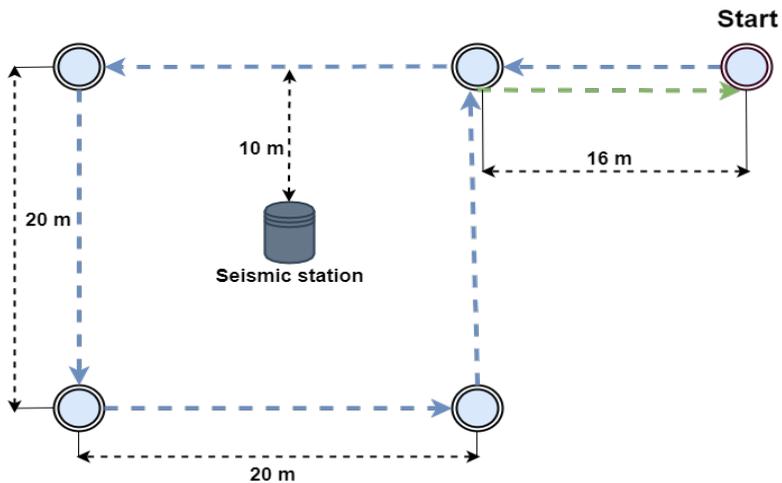


Рис. 3. Схема прохода для эксперимента С. Испытатель проходит из стартовой точки к вершине квадрата 16 метров и далее начинает движение по квадрату со стороной 20 метров, и возвращается к точке старта. Измерительный модуль находится в центре квадрата

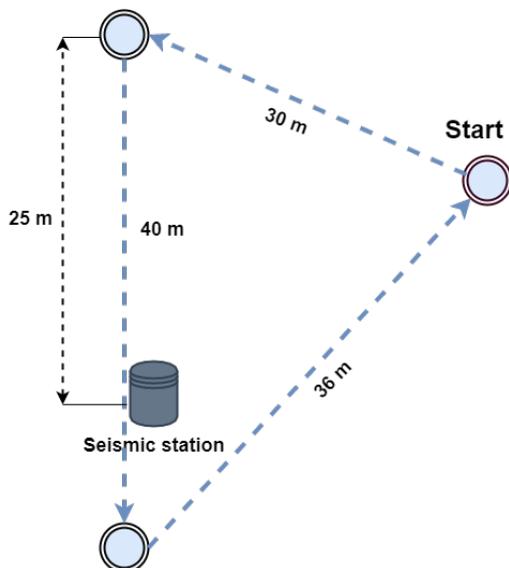


Рис. 4. Схема прохода для эксперимента D. Испытатель движется по треугольнику, на одной из сторон которого находится измерительный модуль. Стороны треугольника равны 30, 36 и 40 метров

3. Обработка результатов. Для анализа данных, полученных с датчиков для регистрации угловых и линейных колебаний в сейсмическом волновом поле поверхностных источников необходима их предварительная фильтрация. Важно выбрать оптимальный частотный диапазон, так как исходный сигнал содержит значительную долю шумов от различных источников (рисунок 5).

Сигналы с рассматриваемых источников не стационарны по своей природе, поэтому распространенный метод преобразования сигнала Фурье здесь не целесообразен, так как преобразование Фурье имеет высокое разрешение в частотной области, однако нулевое во временной. Для подобных задач используется Вейвлет преобразование, поскольку оно обладает всеми преимуществами преобразования Фурье, и при этом Вейвлетные базисы могут быть хорошо локализованными как по частоте, так и по времени.

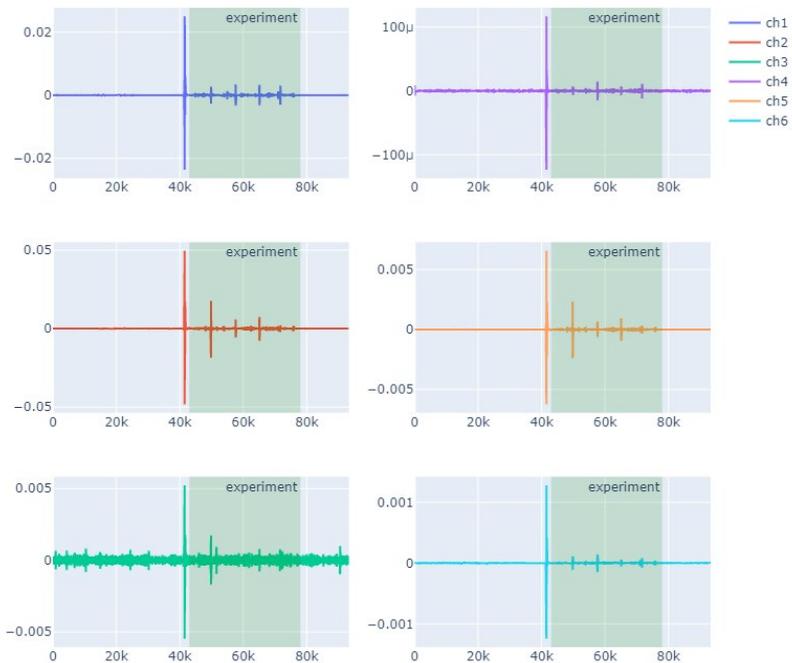


Рис. 5. Пример записи со всех компонент для одного эксперимента. На каждом из 6 графиков представлен сигнал с отдельной компоненты. По оси X – отсчеты АЦП (частота опроса – 500 Гц). По оси Y - амплитуда сигнала в вольтах

В качестве материнского вейвлета был применен вейвлет Морле (рисунок 6). Вейвлет Морле впервые был введен французским геофизиком Жаном Морле в 1984 году. Данный вейвлет широко применяется для геофизических задач [39]. Задается уравнением (1):

$$\psi(r) = \exp\left(ikr - \frac{r^2}{2}\right). \quad (1)$$

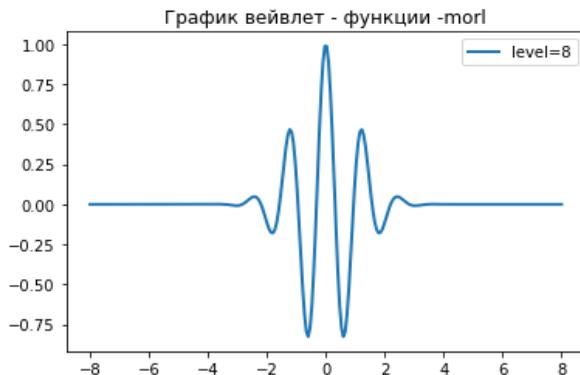


Рис. 6. График вейвлет функции Морле, по оси x – время, по оси y – амплитуда

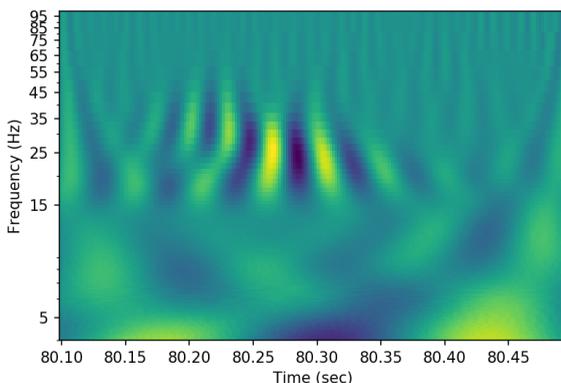


Рис. 7. Спектрограмма сигнала на основе вейвлета Морле. Полезный сигнал находится в диапазоне 10 - 35 Гц, для наглядности изображена спектрограмма до 100 Гц. По оси x – время в секундах, по оси y – частота, Гц

С помощью спектрального анализа, на основе вейвлета Морле, представленного на рисунке 7, было установлено, что наибольшая плотность сигнала в экспериментах находится в области от 10 до 35 Гц.

На основании проведенного анализа был выбран фильтр Баттерворта второго порядка с частотами среза 10 и 35 Гц, так как данный фильтр достаточно простой и позволяет отсечь лишние шумовые сигналы. Сигналы со всех датчиков были пропущены через данный фильтр, результат фильтрации одной из записей представлен на рисунке 8.

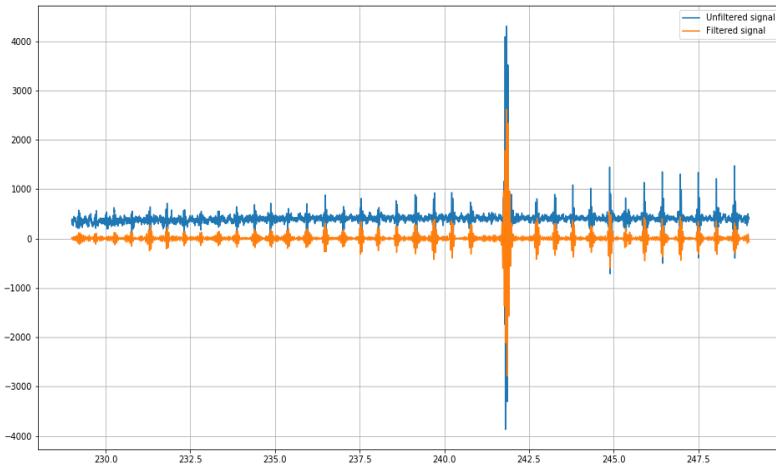


Рис. 8. Сравнение фильтрованного и нефильтрованного сигнала аналогового датчика. По оси x – время в секундах, по оси y – амплитуда в мкВ

Для классификации наличия/отсутствия источника полезного сигнала, были рассмотрены несколько подходов: использование статистических характеристик и MFCC (Мел-частотные кепстральные коэффициенты) параметров [40], а также их совместное применение.

Мел – нелинейная шкала частот, основанная на восприятии высоты звука человеком, мел частоты (m) связана с герцем [41] следующим образом (формула 2):

$$m = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right) = 1127 \ln(1 + f/700). \quad (2)$$

Кепстр – функция обратного преобразования Фурье от логарифма спектра мощности сигнала [42]. Кепстр можно записать следующим выражением:

$$C_S(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \ln |S(\omega)|^2 e^{i\omega q} d\omega, \quad (3)$$

где $S(\omega)$ – спектр входного сигнала.

MFCC параметры были выбраны, поскольку широко применяются при анализе акустических сигналов, например в [43], проводились исследования, где они использовались с сейсмическими данными [44]. Преимущества их применения к текущей задаче состоит в том, что Мел-частотные кепстральные коэффициенты имеют

большее разрешение в низкочастотной области, чем обычные спектральные характеристики. Было использовано по 40 коэффициентов кепстра с каждого сенсора. В качестве статистических характеристик сигнала были использованы следующие: дисперсия, коэффициент эксцесса, энтропия и среднее значение.

Данные были предварительно размечены на участки, содержащие и не содержащие полезный сигнал (рисунок 9). Далее с помощью этих данных была проведена бинарная классификация методом машинного обучения. В качестве метода машинного обучения был выбран градиентный бустинг [45], так как этот алгоритм подходит для нелинейных данных и устойчив к переобучению.

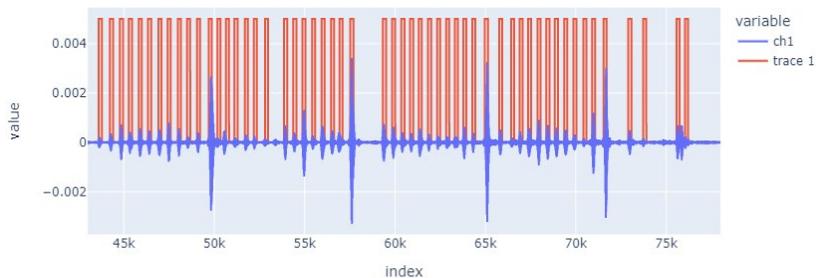


Рис. 9. Результат ручной разметки сигнала. Синим цветом представлен сигнал с датчика, красным цветом выделен человеческий шаг. По оси X – отсчеты АЦП (частота опроса АЦП - 500 Гц). По оси Y – амплитуда сигнала в вольтах

Для каждого отрезка с сигналом были вычислены различные статистические параметры: средняя амплитуда на отрезке, дисперсия, куртозис, энтропия. Кроме того, были извлечены MFCC параметры.

MFCC параметры используются при анализе акустических и сейсмических сигналов [44, 46]. MFCC параметры имеют большее разрешение в низкочастотной области, чем обычные спектральные характеристики.

Для каждого типа сигнала были взяты участки с искомым сигналом и участки с шумом и переданы на обучение моделей в случайном порядке, задача моделирования заключалась в определении, является ли данный сигнал полезным. Так как суммарное количество всех параметров для всех каналов было велико и составило 270 коэффициентов, было решено провести предварительный отбор на основе корреляции с зависимой переменной. Для каждой задачи число параметров оценивалось на основе таблицы корреляций. В целом на

вход модели поступали параметры с корреляцией не ниже 0.2 (рисунок 10).

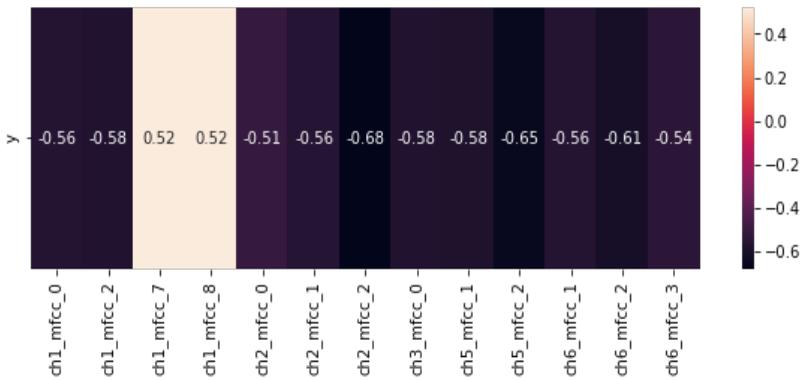


Рис. 10. График корреляций для записей с проходом человека. По оси X – полученные параметры, по оси Y – зависимая бинарная переменная сигнал/шум. Цветом отражена сила корреляции, а цифры в каждом столбце являются значением корреляции с зависимой переменной

Ниже приведена сравнительная таблица результатов обучения модели классификации при помощи описанных параметров, где STAT – статистические характеристики. В качестве метрики валидации была выбрана метрика ROC-AUC (Receiver Operator Characteristic- Area Under Curve) [47], при которой максимальный результат достигается при 1.

ROC-кривая – кривая, которая показывает зависимость количества верно классифицированных положительных результатов от количества неверно классифицированных отрицательных результатов. AUC – площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций, при этом чем выше показатель AUC, тем качественнее классификатор, значение 0,5 демонстрирует непригодность выбранного метода классификации (соответствует случайному результату).

В таблице 2 приведены сравнительные результаты обработки.

Из таблицы 2 видно, что наилучший результат, при классификации наличия источников сигнала, достигается путем совместного применения статистических и MFCC параметров. При небольшом отдалении от сенсора, предположительно до 25 метров, достаточно использовать только статистические характеристики.

Таблица 2. Точность классификации сигнала, метрика ROC-AUC

	Эксперимент А (максимальное удаление от сенсоров 34 м)	Эксперимент В (максимальное удаление от сенсоров 34 м)	Эксперимент С (максимальное удаление от сенсоров 28 м)	Эксперимент D (максимальное удаление от сенсоров 28 м)
STAT	0.905	0.874	0.934	0.969
MFCC	0.941	0.919	0.942	0.984
STAT + MFCC	0.946	0.932	0.958	0.986

Для определения расстояния до источника на основе данных, полученных с датчиков для регистрации угловых и линейных колебаний, был разработан алгоритм классификации наличия полезного сигнала, расстояния и направления до источника его возбуждения, представленный на рисунке 11.

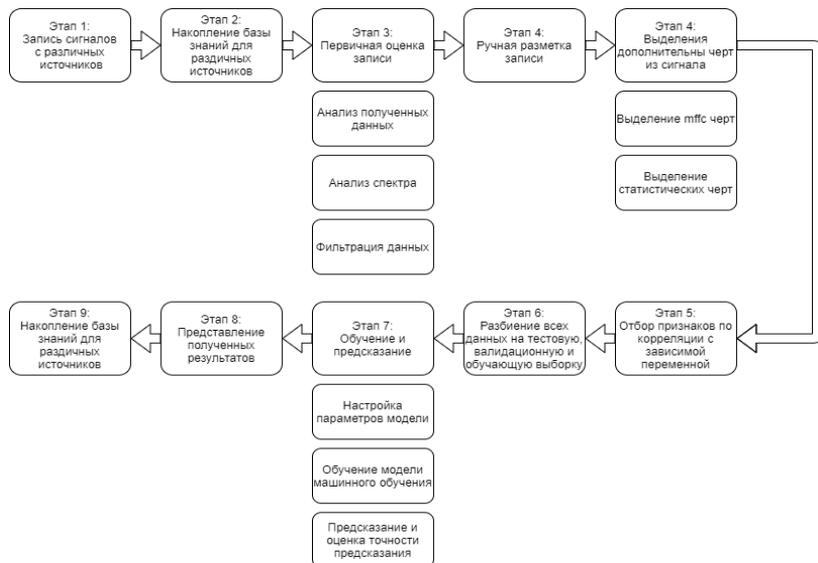


Рис. 11. Этапы алгоритма классификации типа сигнала, направления и расстояния до источника его возбуждения

На первом этапе производится запись эксперимента. Участок проведения тщательно размечается, производится записи о размерах, реперных точках и используемых датчиков в базу данных.

Далее данные загружаются в программу первичной обработки, визуализируются, и проводится первичная оценка их адекватности. В

соответствии с целями проводится фильтрация сигналов, данные о примененных фильтрах также хранятся в базе данных.

На третьем этапе проводится ручная разметка записи. В случае с классификацией сигнала размечается начало сигнала и его длительность, а в случае с расстоянием до источника возбуждения берутся данные о начале и длительности сигнала, и добавляется информация о расстоянии до записывающего сигналы прибора. В случае с определением угла к данным добавляются информация об угле отклонения источника сигнала от прибора.

На четвертом этапе производится извлечение различных характеристик сигнала. Так как общее количество параметров может превышать количество пар амплитуда-фаза для заданного отрезка, что неизбежно приводит к переобучению модели, проводится отбор параметров на основе таблицы корреляции. На вход моделям машинного обучения подаются параметры с силой корреляции не менее 0.2.

Далее данные перемешиваются в случайном порядке, разбиваются на три выборки в соотношении 0.7 : 0.15 : 0.15: тренировочная, валидационная и тестовая и подаются на вход модели машинного обучения. Обучающая выборка необходима непосредственно для обучения, на валидационной выборке модель улучшает свои параметры, в обеих упомянутых выборках модель имеет доступы к истинным ответам. Далее обученная модель получает тестовые данные. Здесь модель машинного обучения уже не имеет доступа к истинным ответам и производит расчёты на основе настроенных ранее параметрах. Полученный результат сравнивается с истинным с помощью различных метрик. На финальном этапе проводится анализ полученных результатов.

В качестве метода определения расстояния до источника сигнала был выбран метод машинного обучения на основе градиентного бустинга с применением ранее полученных статистических и MFCC параметров. Данные с экспериментов были размечены с учетом наличия классифицируемого сигнала, кроме того, были выставлены метки расстояний до этих источников. Метод градиентного бустинга был применен для обучения на тестовых данных на основе выделенных параметров. Обученная модель далее была проверена на новых экспериментальных данных. На рисунке 12 представлены результаты сравнения работы модели и истинных результатов для задачи определения расстояния до источников сигнала. Модель ошибается в определении расстояния в отдельных точках, но хорошо ложится на кривую истинного расстояния.

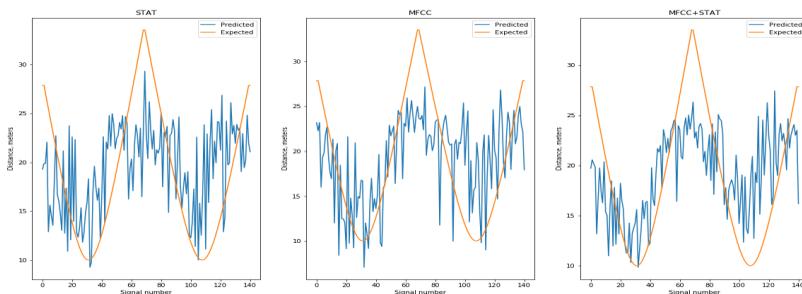


Рис. 12. Сравнение прогнозов моделей по определению расстояния до источника сигнала, обученных на разных наборах параметров. STAT - статистические параметры, MFCC – кепстральные коэффициенты, STAT+MFCC – их совместное применение. Оранжевым цветом обозначен ожидаемый результат, а синим – результат, выданный моделью. По оси x – номер сигнала, по оси y – дистанция в метрах

Модель была обучена с помощью статистических характеристик, с помощью MFCC параметров, а также с совместным их применением. Видно, что если оценивать эксперимент в целом, то в пределах 25 метров все модели показывают результат близкий к истинному. В то же время при оценке дистанции в каждый момент наличия источника сигнала, статистические характеристики дают наилучший результат. Совместное применение MFCC и статистических характеристик дает наилучшие результаты. В тоже время, стоит помнить, что на небольшом количестве экспериментов может появиться переобучение модели машинного обучения, и вследствие чего корректное предсказание новых данных будет затруднено.

Таким образом, наглядно продемонстрировано, что для улучшения качества определения расстояния до источника, необходимо проводить множество экспериментов, при этом чем больший объем новых данных будет получен, тем точнее будет модель. В то же время показано, что на удалении более чем на 25 метров от датчиков для регистрации угловых и линейных колебаний в сейсмическом волновом поле поверхностных источников, определение расстояния до источника, с использованием текущей элементной базы, становится затруднительным.

В таблице 3 показано применение обученной модели ко всем экспериментам, в качестве метрики – среднеквадратичная ошибка (Root Mean Square Error), рассчитанная по всем данным из тестовой выборки для заданного эксперимента. Чем меньше полученное

значение, тем выше качество модели. Лучшие показатели достигаются путем совместного применения статистических и MFCC параметров.

Таблица 3. Точность определения расстояния до источника сигнала, метрика Root Mean Square Error

	Эксперимент А (максимальное удаление от сенсоров 34 м)	Эксперимент В (максимальное удаление от сенсоров 34 м)	Эксперимент С (максимальное удаление от сенсоров 28 м)	Эксперимент D (максимальное удаление от сенсоров 28 м)
STAT	4.272	5.359	2.87	2.982
MFCC	4.372	5.630	3.62	3.526
STAT + MFCC	4.135	5.041	2.84	2.678

В работе определялось направление на источник сигнала, с помощью данных, полученных с линейного вертикального датчика и двух ортогональных датчиков вращательных движений. Для этого был использован алгоритм градиентного бустинга, обученный на тех же вариантах набора параметров: статистические, MFCC, и их комбинация (рисунок 13).

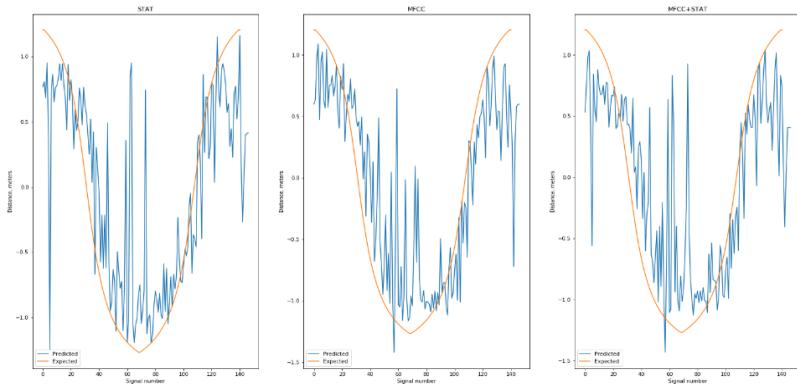


Рис. 13. Сравнение прогнозов моделей для определения направления на источник сигнала, обученных на разных наборах параметров. STAT – статистические параметры, MFCC – кепстральные коэффициенты, STAT+MFCC – их совместное применение. Оранжевым цветом обозначен ожидаемый результат, а синим – результат, выданный моделью. По оси x – номер сигнала, по оси y – угол в радианах

Кроме того, было выполнено сравнение результата обучения модели с направлением на источник сигнала, полученным исходя из особенностей распространения Рэлеевской волны в поверхностной плоскости (рисунок 14). Этот результат был получен исходя из предположения, что движение в вертикальной плоскости обусловлено Рэлеевской волной, таким образом, математически скалярное произведение сигнала с вертикальной компоненты с соответствующими сигналами с горизонтальных компонент вращательных датчиков, явно обуславливает направление распространения Рэлеевской волны, а направление на источник, соответственно, обратно направлению волны.

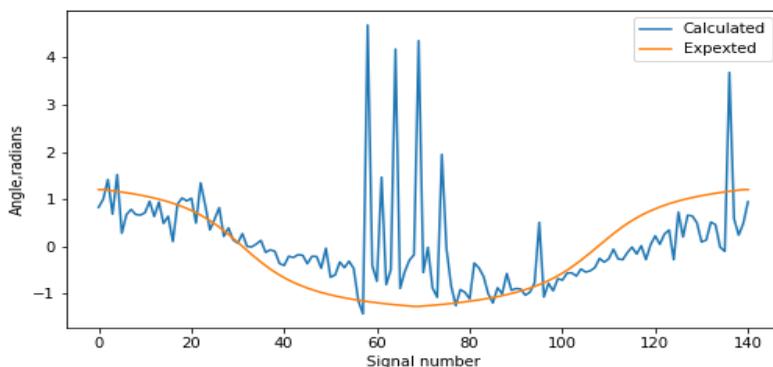


Рис. 14. Результат вычисления направления на источник. Оранжевым цветом обозначен ожидаемый результат, а синим – вычисленный. По оси x – номер сигнала, по оси y – угол в радианах

Заметно, что результаты вычисления угла, в целом, достаточно неплохо соответствуют моделям градиентного бустинга (выбросы вблизи 60-80 соответствуют разности фаз в 2π).

6. Заключение. Таким образом, в рамках работы разработан и протестирован в лабораторных и полевых условиях прототип шестикомпонентного измерительного комплекса для проведения экспериментальных исследований сейсмических событий на основе измерения характеристик граничных волн, создаваемых поверхностными источниками с использованием специальных датчиков. Каждый датчик в составе измерительного комплекса содержит чувствительные молекулярно-электронные элементы угловых и линейных колебаний и характеризуется селективной способностью регистрировать сдвиговую компоненту волнового поля

с высокой чувствительностью. На основе экспериментов впервые удалось получить комплексные и всесторонние исследовательские данные о характере распространения возмущений от поверхностных источников, а также об особенностях распространения волнового сигнала в ближней зоне.

Предложена и апробирована на экспериментальных данных модель волнового процесса распространения сейсмических возмущений от поверхностного источника. Новизна модели обусловлена применением 6-компонентной поляризационной модели для различных типов волн. На основе модели разработан алгоритм, который позволяет автоматически идентифицировать и, соответственно, отделять приходящие волны на основе их поляризационных характеристик.

Представлен алгоритм обработки данных, получаемых по методике сейсмических наблюдений с использованием датчиков для регистрации угловых и линейных колебаний в сейсмическом волновом поле поверхностных источников. Алгоритм обработки использует вейвлет анализ на основе вейвлета Морле. Было установлено, что наибольшая плотность сигнала находится в области от 10 до 35 Гц. Был использован цифровой фильтр Баттерворта 2го порядка с частотами среза 10 и 35 Гц.

Для разработки алгоритма анализа данных для определения расстояния и азимута до пункта возбуждения поверхностных волн, были рассмотрены несколько подходов: использование статистических характеристик и технологии с применением черт MFCC (Мел-частотные кепстральные коэффициенты), а также их совместное применение. Наилучший результат достигается путем совместного применения статистических и MFCC характеристик. При небольшом отдалении от сенсора, до 25 метров, оказалось достаточным использовать только статистические характеристики. Полученные результаты показывают возможность корректной идентификации источника на уровне около 80%.

Отметим, что представленные результаты уникальны тем, что предполагают использование единственного точечного приемника, то есть принципиально не использует данные по времени задержки сигнала. Указанное справедливо как при реализации алгоритмов идентификации источника, так и для определения координат источника в полярной системе координат.

Литература

1. Sun L., Wang Y., Yang J., Zhang Y., Wang S. Progress in Rotational Seismology. *Earth Science*. 2021. 46(4). pp. 1518-1536.
2. Kurrle D., Igel H., Ferreira A.M.G., Wassermann J., and Schreiber U. Can we estimate local Love wave dispersion properties from collocated amplitude measurements of translations and rotations? *Geophysical research letters*. 2010. vol. 37.
3. Schmelzbach C., Donner S., Igel H., Sollberger D., Taufiqurrahman T., Bernauer F., Hausler M., van Renterghem C., Wassermann J., Robertsson J. Advances in 6C seismology: Applications of combined translational and rotational motion measurements in global and exploration seismology. *Geophysics*. 2018. vol. 83. WC53-WC69.
4. Li Z., van der Baan M. Seismology Elastic passive source localization using rotational motion. *Geophys. J. Int.* 2017. vol. 211. pp. 1206-1222.
5. Van Renterghem C., Schmelzbach C., Sollberger D., Robertsson J.O.A. Spatial wavefield gradient-based seismic wavefield separation. *Geophys. J. Int.* 2018. vol. 212. p. 2017.
6. Sollberger D., Greenhalgh S.A., Schmelzbach C., Van Renterghem C., Robertsson J.O.A. 6-C polarization analysis using point measurements of translational and rotational ground-motion: theory and applications. *Geophysical Journal International*. 2018. vol. 213.
7. Schmidt R.O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1986. vol. AP-34. pp. 276-280.
8. Trifunac M.D. Effects of torsional and rocking excitations on the response of structures. In *Earthquake Source Asymmetry. Structural Media and Rotation Effects*, Ed. Teisseyre R., Takeo M., Majewski E., Berlin: Springer, 2006. pp. 569-582.
9. Jalali R.S., Trifunac M.D. Response spectra for near-source, differential and rotational strong motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. vol. 99 (2B), pp. 1404-1415.
10. Zembaty Z. Rotational seismic load definition in Eurocode 8, Part 6 for slender, tower-shaped structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. vol. 99 (2B), pp. 1483-1485.
11. Gicev V., Trifunac M.D. Transient and permanent rotations in a shear layer excited by strong earthquake pulses. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. vol. 99 (2B), pp. 1391-1403.
12. Trifunac M.D. 75th anniversary of strong motion observation – a historical review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009. vol. 29 (4), pp. 591-606.
13. Шевченко Д.В., Шевченко В.П. Выбор и оптимизация структуры построения автономных сейсмических средств обнаружения рубежного типа // *Материалы VIII всероссийской научно-технической конференции «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов»*. 2010. С. 128–133.
14. Вольсков А.А. Выбор частоты дискретизации сигнала для решения задачи пассивной сейсмической пеленгации // *Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов»*. 2010. С. 128–133
15. Igel H., Bernauer M., Wassermann J., Schreiber K.U. *Seismology, rotational, complexity: Encyclopedia of complexity and systems science*: Springer Science and Business Media New York, 2015.
16. Lee W.H.K., Igel H., Trifunac M.D. Recent advances in rotational seismology. *Seismological Research Letter*. 2009. vol. 80. no. 3. pp. 479–490.

17. Van Driel M., Wassermann J., Nader M.F., Schubert H. B.S.A., Igel H. Strain rotation coupling and its implications on the measurement of rotational ground motions. *Journal of Seismology*. 2012. vol. 16. no. 4. pp. 657–668.
18. Muzyert E., Kashubin A., Kragh E., Edme P. Land seismic data acquisition using rotation sensors. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2012. pp. 1–5.
19. Агафонов В.М., Афанасьев К.А., Яшкин А.В. Определение направления на движущийся объект с использованием сейсмического модуля, содержащего молекулярно-электронные датчики движения. *Труды МФТИ*. 2013. Т. 5. № 2. С. 142–149.
20. Li Z., Van der Baan M. Enhanced microseismic event localization by reverse time extrapolation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2015, pp. 4111–4115.
21. Li Z.H., Van der Baan M. Elastic passive source localization using rotational motion. *Geophysical Journal International*. 2017. vol. 211(2). pp. 1206–1222.
22. Barak O., Herkenhoff F., Dash R., Jaiswal P., Giles J., de Ridder S., Brune R., Ronen S. Six-component seismic land data acquired with geophones and rotation sensors: Wave-mode selectivity by application of multicomponent polarization filtering. *The Leading Edge*. 2014. vol. 11. pp. 1224–1232.
23. Edme P., Muzyert E. Rotational data measurement. 75th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2013. pp. 1–4.
24. Edme P., Muzyert E. Efficient land seismic acquisition sampling using rotational data. 76th EAGE Conference and Exhibition. Extended abstract, 2014. pp. 1–4.
25. Патент США US9766355B2 Use of vector rotational measurements and vector pressure gradient measurements to enhance spatial sampling of dual-sensor water bottom seismic data. 19/09/2017.
26. Патент США US9664806B2 Method to improve spatial sampling of vertical motion of seismic wavefields on the water bottom by utilizing horizontal rotational motion and vertical motion sensors. 30/05/2017.
27. Патент Китай CN110612462A System and method for formation evaluation from a wellbore. 24/12/2019.
28. Egorov E., Agafonov V., Avdyukhina S., Borisov S. Angular Molecular–Electronic Sensor with Negative Magnetohydrodynamic Feedback Sensors. 2018. vol. 18, p. 245.
29. Anikin, E. Egorov E., Agafonov V. Mechanical sensors Dependence of Self-Noise of the Angular Motion Sensor Based on the Technology of Molecular–Electronic Transfer, on the Area of the Electrodes. *IEE Sensors Lett.*, 2018. vol. 2. no. 2. pp. 1–4.
30. Zaitsev D., Shabalina A. The features of low-temperature operation for electrochemical sensors of motion parameters for the economic development of the arctic region of the Russian Federation in the fields of geophysics, seismology and seismic exploration, 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2021. vol. 21, no. 1.1. pp. 759–768.
31. Zaitsev D., Egorov I., Agafonov V. A Comparative Study of Aqueous and Non-Aqueous Solvents to Be Used in Low-Temperature Serial Molecular–Electronic Sensors. *Chemosensors*, 2022.
32. Egorov E., Shabalina A., Zaitsev D., Kurkov S., Gueorguiev N. Frequency Response Stabilization and Comparative Studies of MET Hydrophone at Marine Seismic Exploration Systems. *Sensors*, 2020.
33. Chikishev D.A., Zaitsev D.L., Belotelov K.S., Egorov I.V. The Temperature Dependence of Amplitude- Frequency Response of the MET Sensor of Linear Motion in a Broad Frequency Range, in *IEEE Sensors Journal*, 2019. vol. 19. no. 21. pp. 9653–9661.
34. Neeshpapa A., Antonov A., Zaitsev D., Egorov E., Agafonov V. Geophysical system of permanent installation for underwater monitoring of seismic events, 20th

- International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2020. vol. 20. no. 1.3. pp. 17-24.
35. Li M., Shen H., Guo Yu., Mengxiong X. Locating microseismic events using multiplicative time reversal imaging based on decoupled wavefields in 2D VTI media: Theoretical and synthetic cases studies, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021. vol. 202. p. 108547.
 36. Sollberger D., Igel H., Schmelzbach C., Edme P., van Manen D.-J., Bernauer F., Yuan S., Wassermann J., Schreiber U., Robertsson J.O.A. Seismological Processing of Six Degree-of-Freedom Ground-Motion Data. *Sensors*, 2020. vol. 20. p. 6904. doi: 10.3390/s20236904.
 37. Pytel W., Fuławka K., Mertuszka P., Pałac-Walko B. Validation of Rayleigh Wave Theoretical Formulation with Single-Station Rotational Records of Mine Tremors in Lower Silesian Copper Basin. *Sensors*, 2021. vol. 21. p. 3566. doi: 10.3390/s21103566.
 38. Available at: http://r-sensors.ru/ru/products/data_loggers/ndas-8226_rus/ (accessed 06/09/2022).
 39. Кулеш М.А., Диалло М.С., Хольнайдер М. Вейвлет-анализ эллиптических, дисперсионных и диссипативных свойств волн Рэлея // *Акустический журнал*. 2005. Т. 51. № 4. С. 500-510.
 40. Davis S., Mermelstein P. Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1980. vol. 28. no. 4. pp. 357–366.
 41. O'Shaughnessy D. *Speech Communication: Human and Machine*. Addison-Wesley Pub. Co., 1987. p. 150.
 42. Опленгейм А.В., Шафер Р.В. *Цифровая обработка сигналов. Digital Signal Processing (рус.) / Пер. с англ. / Под ред. С.Я. Шаца. М.: Связь, 1979.*
 43. Zheng F., Zhang G., Song Z. COMPARISON OF DIFFERENT IMPLEMENTATIONS OF MFCC J. *Computer Science & Technology*, 2001. vol. 16(6). pp. 582-589.
 44. Xie T., Zheng X., Zhang Y. Seismic facies analysis based on speech recognition feature parameters. *Geophysics*. 2017. vol. 82. no. 3. pp. 023–035.
 45. Friedman J.H. *Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine*, 1999.
 46. Zheng F., Zhang G., Song Z. Comparison of different implementations of MFCC J. *Computer Science & Technology*. 2001. vol. 16(6). pp. 582-589.
 47. Powers D.M.W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*. 2011.

Зайцев Дмитрий Леонидович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ООО «Р-сенсор». Область научных интересов: физическая электроника, приборостроение, информационные системы, сейсмика, геофизика, электрохимия. Число научных публикаций — 60. Zaitcev.dl@mipt.ru; Лихачевский проезд, 4/1, 141700, Долгопрудный, Россия; р.т.: +7(498)744-6995.

Брыксин Виталий Михайлович — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, НИИ прикладной информатики и математической геофизики БФУ им. И. Канта. Область научных интересов: математическая моделирование, численные методы, дистанционное зондирование, геофизика. Число научных публикаций — 130. vbryksin@kantiana.ru; улица Александра Невского, 14, 236041, Калининград, Россия; р.т.: +7(4012)595-558.

Белотелов Константин Сергеевич — ведущий инженер, ООО «Р-сенсорс». Область научных интересов: математическая статистика, теория вероятности, машинное обучение, математическое моделирование, сейсмика, геофизика, электрохимия. Число научных публикаций — 12. costia.17@gmail.com; Лихачевский проезд, 4/1, 141700, Долгопрудный, Россия; р.т.: +7(498)744-6995.

Компаниец Юлия Игоревна — инженер, ООО «Р-сенсорс». Область научных интересов: математическая статистика, теория вероятности, машинное обучение, математическое моделирование. Число научных публикаций — 3. kompaniets.yu@ya.ru; Лихачевский проезд, 4/1, 141700, Долгопрудный, Россия; р.т.: +7(498)744-6995.

Яковлев Роман Никитич — младший научный сотрудник, лабораторий технологий больших данных социоконвергентных систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: модели, технологии и архитектуры конвергентных и социоконвергентных систем, модели машинного обучения в компьютерном зрении. Число научных публикаций — 30. iakovlev.r@mail.ru; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-3311.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-69-00231, <https://rscf.ru/project/22-69-00231/>.

D. ZAITSEV, V. BRYK SIN, K. BELOTELOV, Y. KOMPANIETS, R. IAKOVLEV
**ALGORITHMS AND MEASURING COMPLEX FOR
CLASSIFICATION OF SEISMIC SIGNAL SOURCES,
DETERMINATION OF DISTANCE AND AZIMUTH TO THE
POINT OF EXCITATION OF SURFACE WAVES**

Zaitsev D., Bryksin V., Belotelov K., Kompaniets Y., Iakovlev R. Algorithms and Measuring Complex for Classification of Seismic Signal Sources, Determination of Distance and Azimuth to the Point of Excitation of Surface Waves.

Abstract. Machine learning and digital signal processing methods are used in various industries, including in the analysis and classification of seismic signals from surface sources. The developed wave type analysis algorithm makes it possible to automatically identify and, accordingly, separate incoming seismic waves based on their characteristics. To distinguish the types of waves, a seismic measuring complex is used that determines the characteristics of the boundary waves of surface sources using special molecular electronic sensors of angular and linear oscillations. The results of the algorithm for processing data obtained by the method of seismic observations using spectral analysis based on the Morlet wavelet are presented. The paper also describes an algorithm for classifying signal sources, determining the distance and azimuth to the point of excitation of surface waves, considers the use of statistical characteristics and MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients) parameters, as well as their joint application. At the same time, the following were used as statistical characteristics of the signal: variance, kurtosis coefficient, entropy and average value, and gradient boosting was chosen as a machine learning method; a machine learning method based on gradient boosting using statistical and MFCC parameters was used as a method for determining the distance to the signal source. The training was conducted on test data based on the selected special parameters of signals from sources of seismic excitation of surface waves. From a practical point of view, new methods of seismic observations and analysis of boundary waves make it possible to solve the problem of ensuring a dense arrangement of sensors in hard-to-reach places, eliminate the lack of knowledge in algorithms for processing data from seismic sensors of angular movements, classify and systematize sources, improve prediction accuracy, implement algorithms for locating and tracking sources. The aim of the work was to create algorithms for processing seismic data for classifying signal sources, determining the distance and azimuth to the point of excitation of surface waves.

Keywords: boundary waves, molecular electronics, wavelet analysis, machine learning, azimuth determination, distance determination, data processing algorithm.

References

1. Sun L., Wang Y., Yang J., Zhang Y., Wang S. Progress in Rotational Seismology. Earth Science. 2021. 46(4). pp. 1518-1536.
2. Kurrle D., Igel H., Ferreira A.M.G., Wassermann J., Schreiber U. Can we estimate local Love wave dispersion properties from collocated amplitude measurements of translations and rotations? Geophysical research letters. 2010. vol. 37.
3. Schmelzbach C., Donner S., Igel H., Sollberger D., Taufiqurrahman T., Bernauer F., Häusler M., Van Renterghem C., Wassermann J., Robertsson J. Advances in 6C seismology: Applications of combined translational and rotational motion measurements in global and exploration seismology. Geophysics. 2018. vol. 83. pp. WC53-WC69.

4. Li Z., Van der Baan M. Seismology Elastic passive source localization using rotational motion Geophys. J. Int. 2017. vol. 211. pp. 1206–1222.
5. Van Renterghem C., Schmelzbach C., Sollberger D., Robertsson J.O.A. Spatial wavefield gradient-based seismic wavefield separation Geophys. J. Int. 2018. vol. 212. p. 2017.
6. Sollberger D., Greenhalgh S.A., Schmelzbach C., Van Renterghem C., Robertsson J.O.A. 6-C polarization analysis using point measurements of translational and rotational ground-motion: theory and applications. Geophysical Journal International. 2018. vol. 213.
7. Schmidt, R.O. "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," IEEE Trans. Antennas Propagation, 1986. vol. AP-34. pp. 276-280.
8. Trifunac M.D. Effects of torsional and rocking excitations on the response of structures. In Earthquake Source Asymmetry. Structural Media and Rotation Effects, Ed. Teisseyre R., Takeo M., Majewski E., Berlin: Springer, 2006. pp. 569-582.
9. Jalali R.S., Trifunac M.D. Response spectra for near-source, differential and rotational strong motion. Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. vol. 99 (2B), pp. 1404-1415.
10. Zembaty Z. Rotational seismic load definition in Eurocode 8, Part 6 for slender, tower-shaped structures. Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. vol. 99 (2B), pp. 1483-1485.
11. Gicev V., Trifunac M.D. Transient and permanent rotations in a shear layer excited by strong earthquake pulses. Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. vol. 99 (2B), pp. 1391-1403.
12. Trifunac M.D. 75th anniversary of strong motion observation – a historical review. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. vol. 29 (4), pp. 591-606.
13. Shevchenko D.V., Shevchenko V.P. [The choice and optimization of the structure of the construction of autonomous seismic detection devices of the boundary type]. Materialy VIII vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennyye ohrannyye tehnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti obektov» [Modern security technologies and means of ensuring complex safety of objects: Materials of Conference], 2010. pp. 128-133. (In Russian).
14. Volskov A.A. [The choice of the sampling frequency of the signal for solving the problem of passive seismic direction finding]. Materialy VIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennyye ohrannyye tehnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti obektov» [Materials of the Conferenc], 2010. pp. 128-133. (In Russ.).
15. Igel H., Bernauer M., Wassermann J., Schreiber K.U. Seismology, rotational, complexity: Encyclopedia of complexity and systems science: Springer Science and Business Media New York, 2015.
16. Lee W.H.K., Igel H., Trifunac M.D. Recent advances in rotational seismology. Seismological Research Letter. 2009. vol. 80. no. 3. pp. 479–490.
17. Van Driel M., Wassermann J., Nader M.F., Schubert B.S.A., Igel H. Strain rotation coupling and its implications on the measurement of rotational ground motions. Journal of Seismology. 2012. vol. 16. no. 4. pp. 657–668.
18. Muzert E., Kashubin A., Kragh E., Edme P. Land seismic data acquisition using rotation sensors. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2012. pp. 1–5.
19. Agafonov V.M., Afanasyev K.A., Yashkin A.V. [Determination of the direction to a moving object using a seismic module containing molecular electronic motion sensors]. Trudy MFTI – Proceedings of MIPT. 2013. vol. 5. no. 2. pp. 142-149. (In Russ.).
20. Li Z., Van der Baan M. Enhanced microseismic event localization by reverse time extrapolation. SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2015, pp. 4111–4115.
21. Li Z.H., Van der Baan M. Elastic passive source localization using rotational motion. Geophysical Journal International. 2017. vol. 211(2). pp. 1206–1222.

22. Barak O., Herkenhoff F., Dash R., Jaiswal P., Giles J., de Ridder S., Brune R., Ronen S. Six-component seismic land data acquired with geophones and rotation sensors: Wave-mode selectivity by application of multicomponent polarization filtering. *The Leading Edge*. 2014. vol. 11. pp. 1224–1232.
23. Edme P., Muyzert E. Rotational data measurement. 75th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2013. pp. 1–4.
24. Edme P., Muyzert E. Efficient land seismic acquisition sampling using rotational data. 76th EAGE Conference and Exhibition. Extended abstract, 2014. pp. 1–4.
25. US9766355B2 [Use of vector rotational measurements and vector pressure gradient measurements to enhance spatial sampling of dual-sensor water bottom seismic data]. 19/09/2017. (In Russ.).
26. US9664806B2 [Method to improve spatial sampling of vertical motion of seismic wavefields on the water bottom by utilizing horizontal rotational motion and vertical motion sensors]. 30/05/2017. (In Russ.).
27. CN110612462A [System and method for formation evaluation from a wellbore]. 24/12/2019. (In Russ.).
28. Egorov E., Agafonov V., Avdyukhina S., Borisov S. Angular Molecular–Electronic Sensor with Negative Magneto-hydrodynamic Feedback Sensors. 2018. vol. 18, p. 245.
29. Anikin, E. Egorov E., Agafonov V. Mechanical sensors Dependence of Self-Noise of the Angular Motion Sensor Based on the Technology of Molecular-Electronic Transfer, on the Area of the Electrodes. *IEE Sensors Lett.*, 2018. vol. 2. no. 2. pp. 1–4.
30. Zaitsev D., Shabalina A. The features of low-temperature operation for electrochemical sensors of motion parameters for the economic development of the arctic region of the Russian Federation in the fields of geophysics, seismology and seismic exploration, 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2021. vol. 21, no. 1.1. pp. 759-768.
31. Zaitsev D., Egorov I., Agafonov V. A Comparative Study of Aqueous and Non-Aqueous Solvents to Be Used in Low-Temperature Serial Molecular–Electronic Sensors. *Chemosensors*, 2022.
32. Egorov E., Shabalina A., Zaitsev D., Kurkov S., Gueorguiev N. Frequency Response Stabilization and Comparative Studies of MET Hydrophone at Marine Seismic Exploration Systems. *Sensors*, 2020.
33. Chikishev D.A., Zaitsev D.L., Belotelov K.S., Egorov I.V. The Temperature Dependence of Amplitude- Frequency Response of the MET Sensor of Linear Motion in a Broad Frequency Range, in *IEEE Sensors Journal*, 2019. vol. 19. no. 21. pp. 9653-9661.
34. Neeshpapa A., Antonov A., Zaitsev D., Egorov E., Agafonov V. Geophysical system of permanent installation for underwater monitoring of seismic events, 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2020. vol. 20. no. 1.3. pp. 17-24.
35. Li M., Shen H., Guo Yu., Mengxiong X. Locating microseismic events using multiplicative time reversal imaging based on decoupled wavefields in 2D VTI media: Theoretical and synthetic cases studies, *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. vol. 202. p. 108547.
36. Sollberger D., Igel H., Schmelzbach C., Edme P., van Manen D.-J., Bernauer F., Yuan S., Wassermann J., Schreiber U., Robertsson J.O.A. Seismological Processing of Six Degree-of-Freedom Ground-Motion Data. *Sensors*, 2020. vol. 20. p. 6904. doi: 10.3390/s20236904.
37. Pytel W., Fuławka K., Mertuszka P., Pałac-Walko B. Validation of Rayleigh Wave Theoretical Formulation with Single-Station Rotational Records of Mine Tremors in Lower Silesian Copper Basin. *Sensors*, 2021. vol. 21. p. 3566. doi: 10.3390/s21103566.
38. Available at: http://r-sensors.ru/ru/products/data_loggers/ndas-8226_rus/ (accessed 06/09/2022).

39. Kulesh M.A., Diallo M.S., Holschneider M. [Wavelet analysis of elliptical, dispersive and dissipative properties of Rayleigh waves]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustic Journal*. 2005. vol. 51. no. 4. pp. 500-510. (In Russ.).
40. Davis S., Mermelstein P. Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1980. vol. 28. no. 4. pp. 357–366.
41. O'Shaughnessy D. *Speech Communication: Human and Machine*. Addison-Wesley Pub. Co., 1987. p. 150.
42. Oppenheim A.V., Schaffer R.V. [Digital Signal Processing] (Russ. ed.: Shac S.Ja.). M.: Svyaz', 1979. (In Russ.).
43. Zheng F., Zhang G., Song Z. COMPARISON OF DIFFERENT IMPLEMENTATIONS OF MFCC *J. Computer Science & Technology*, 2001. vol. 16(6). pp. 582-589.
44. Xie T., Zheng X., Zhang Y. Seismic facies analysis based on speech recognition feature parameters. *Geophysics*. 2017. vol. 82. no. 3. pp. 023–035.
45. Friedman J.H. *Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine*, 1999.
46. Zheng F., Zhang G., Song Z. Comparison of different implementations of MFCC *J. Computer Science & Technology*. 2001. vol. 16(6). pp. 582-589.
47. Powers D.M.W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*. 2011.

Zaitsev Dmitry — Ph.D., Senior researcher, R-sensors LLC. Research interests: physical electronics, instrumentation, information systems, seismics, geophysics, electrochemistry. The number of publications — 60. Zaitcev.dl@mipt.ru; 4/1, Likhachevsky proezd, 141700, Dolgoprudny, Russia; office phone: +7(498)744-6995.

Bryksin Vitaliy — Ph.D., Associate Professor, Senior researcher, Research Institute of Applied Informatics and Mathematical Geophysics of Immanuel Kant Baltic Federal University. Research interests: mathematical modeling, numerical methods, remote sensing, geophysics. The number of publications — 130. vbryksin@kantiana.ru; 14, Alexander Nevsky St., 236041, Kaliningrad, Russia; office phone: +7(4012)595-558.

Belotelov Konstantin — Leading engineer, R-sensors LLC. Research interests: mathematic statistics, machine learning, probability theory, mathematical modeling, seismics, geophysics, electrochemistry. The number of publications — 12. costia.17@gmail.com; 4/1, Likhachevsky proezd, 141700, Dolgoprudny, Russia; office phone: +7(498)744-6995.

Kompaniets Yulia — Engineer, R-sensors LLC. Research interests: mathematic statistics, machine learning, probability theory, mathematical modeling. The number of publications — 3. kompaniets.yu@ya.ru; 4/1, Likhachevsky proezd, 141700, Dolgoprudny, Russia; office phone: +7(498)744-6995.

Iakovlev Roman — Junior researcher, Laboratory of big data technologies in socio-cyberphysical systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: models, technologies and architectures of cyberphysical and socio-cyberphysical systems, machine learning models in computer vision. The number of publications — 30. iakovlev.r@mail.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-3311.

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No.22-69-00231, <https://rscf.ru/en/project/22-69-00231/>.