

УДК 550.34.03, 550.34.06, 534-6

Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS

© 2021 г. В.Э. Асминг, А.В. Федоров, А.В. Прокудина

КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия

Поступила в редакцию 14.12.2020 г.

Аннотация. В Кольском филиале (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН были протестированы и реализованы в виде отдельных программ алгоритмы локации региональных и локальных сейсмических событий. Ряд оригинальных алгоритмов был разработан сотрудниками КоФ. Был опробован и внедрён в практику набор программных инструментов, которые оказались полезными для обработки записей сейсмических и инфразвуковых событий. Создан современный картографический модуль. В 2020 г. была создана программа LOS, которая объединила наиболее эффективные инструменты обработки сигналов, алгоритмы локации, базу данных и картографическую систему. В программу вошли следующие инструменты: полосовая и адаптивная фильтрация, поляризационный анализ и расчёт азимутов на события по трёхкомпонентной записи, расчёт азимутов и кажущихся скоростей подходов волн для сейсмических и инфразвуковых групп. Для анализа записей инфразвуковых групп реализован кросскорреляционный анализ, позволяющий отслеживать изменение азимутов и кажущихся скоростей приходов сигналов в зависимости от времени. Реализованы следующие алгоритмы локации: минимизация совокупной невязки оценки времени в очаге по первым приходам волн совместно с невязкой азимутов, поиск источника путём максимизации рейтинговой функции на сетках, а также некоторые комбинации этих алгоритмов. Способы применения алгоритмов сгруппированы в так называемые сценарии локации, которые выбираются пользователем исходя из конкретной ситуации. Также в программе реализован алгоритм локации на стохастическом графе. Он может оказаться полезным при локации событий в существенно неоднородной среде, возможно, с пустотами и выемками, а также для учёта рельефа. Этот алгоритм может быть использован, в частности, при локации событий, произошедших в рудниках, с помощью локальных рудничных сейсмосетей. Программа LOS внедрена в практику работ Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

Ключевые слова: сейсмология, акустика, программа, обработка сигналов, сейсмическая локация, инфразвук, инфразвуковая группа.

Для цитирования: Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 27–40. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02>

Введение

В Кольском филиале (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН в течение многих лет ведутся работы по созданию и внедрению методов детектирования и локации сейсмических и инфразвуковых событий, автоматической и интерактивной обработки записей сейсмических и инфразвуковых сигналов. В 1996 г. было начато создание программного комплекса EL [Асминг, 1997]. В нём были реализованы алгоритм локации сейсмических событий методом минимизации невязки оценки времени в очаге, формализованный метод засечек, оценка азимута по сейсмической группе. Был реализован доступ к данным в формате CSS 3.0.

Для локации использовались одномерные годографы [Асминг, 2004].

Программа EL и её дальнейшие модификации EL_WIN и ELRESS развивались в течение многих лет. В частности, для локации сейсмических событий было реализовано использование сложных скоростных моделей с использованием регионализации по Бондарю и станционных поправок [Bondar et al., 1998; Xiaoping, 2001]. Также программа EL использовалась для просмотра записей инфразвуковых сигналов, расчёта азимутов на их источники.

В 2013 г. была разработана программа «Сейсмokonфигуратор». Сейсмическая среда в этой программе представлялась в виде стохастического

графа, вершины которого символизировали точки среды, а рёбра – пути пробега между этими точками. Длина рёбер соответствовала времени пробега сейсмической волны между точками. Такое представление оказалось удобным для локации сейсмических событий в существенно неоднородных, трёхмерных средах, возможно, с пустотами. Для этого был реализован оригинальный алгоритм локации, основанный на инверсии времён приходов сейсмических волн на станции [Асминг и др., 2013].

В 2015 г. было начато создание системы автоматического детектирования и локации сейсмических событий NSDL [Асминг, Прокудина, 2016; Федоров et al., 2019]. В систему вошла программа ассоциации и локации событий по нескольким станциям NAS. В ней был реализован новый алгоритм локации сейсмических событий, основанный на комбинации двух методов – максимизации рейтинговой функции на сетке и минимизации невязки оценки времени в очаге. Программа NAS оказалась полезной не только как часть автоматической системы NSDL. Она была неоднократно использована для аккуратной локации и оценки эллипсов ошибок и диапазонов глубин сейсмических событий в ручном режиме [Morozov et al., 2019].

Для обработки инфразвуковых сигналов в КоФ ФИЦ ЕГС РАН была разработана программа VarPlot [Асминг и др., 2009]. Программа позволяла отображать значения кросс-корреляции между каналами инфразвуковой группы в зависимости от предполагаемых азимута и кажущейся скорости прихода волны на

группу. Программа оказалась удобным средством визуализации свойств инфразвуковых сигналов и широко использовалась, в частности, для анализа инфразвука, излучаемого при пролёте метеоритов [Евтюгина, Асминг, 2018].

Упомянем ещё раз разрабатывавшуюся с 2000 г. картографическую программу BearMap. Программа позволяет создавать карты-проекты, состоящие как из растровых, так и из векторных элементов.

В 2020 г. было принято решение объединить наилучшие, проверенные временем инструменты интерактивного анализа инфразвуковых и сейсмических сигналов, алгоритмы локации событий в единую программу, а также реализовать в этой программе современный интерфейс, универсальные методы доступа к исходным данным, картографическую систему, предоставляющую пользователю возможность работы с картами, нужными в конкретных случаях.

К концу 2020 г. программа была в основном создана. Она получила название LOS («Локатор сейсмичности»). Ниже рассмотрим подходы к локации событий, положенные в её основу, инструменты обработки данных, методы доступа к данным и интерфейс программы.

Интерфейс программы

Главное окно программы содержит ряд вкладок, в которых сгруппированы инструменты, выполняющие различные функции. Наиболее часто используется вкладка просмотра волновых форм (рис. 1). Изображение волновых форм на экране

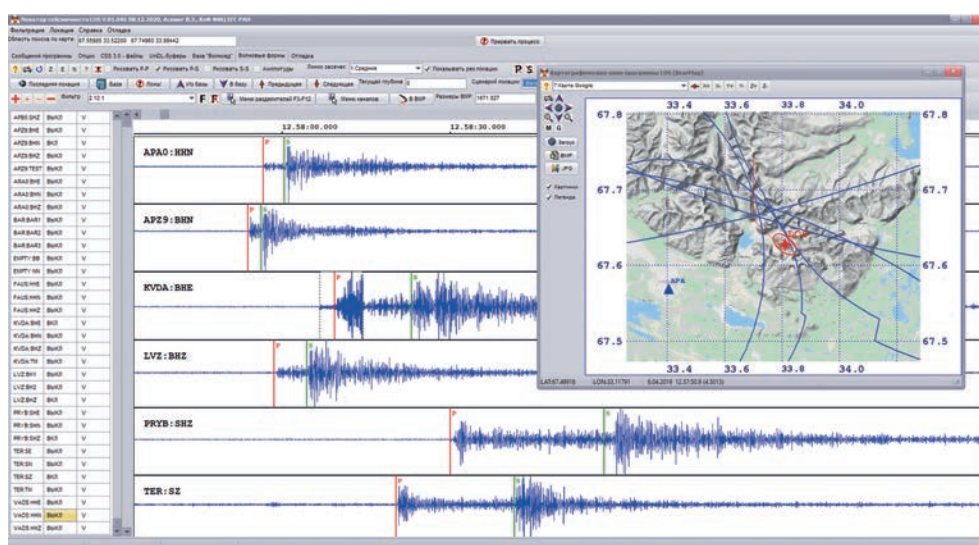


Рис. 1. Образ экрана программы LOS в режиме просмотра волновых форм.

На карте отображены линии засечек, результат локации и эллипс ошибок. На канале KVDA: BHE включена экранная лупа для уточнения момента прихода P-волны

масштабируется вращением колеса прокрутки «мыши», для перемещения изображения реализован режим “drag and drop” (перетащить и отпустить). Для точного определения моментов приходов волн реализована экранная лупа, т.е. увеличение масштаба в интересующем пользователя фрагменте экрана. Образ экрана может быть сохранён в высоком разрешении для использования в публикациях.

Программа LOS использует цифровые карты – проекты, созданные в картографической программе BearMap, разработанной в КоФ ФИЦ ЕГС РАН в предыдущие годы. Проекты BearMap могут включать в себя как векторные, так и растровые графические элементы. Карты для LOS формируются заранее и описываются в конфигурационном файле программы.

Карты отображаются в отдельном окне, которое может быть открыто одновременно с основным окном программы. При работе пользователя с волновыми формами на карте оперативно отображаются результаты его работы – линии засечек, азимуты, положения слоцированных событий, эллипсы ошибок. При поиске в базе данных найденные события отображаются в виде маркеров на карте. Карту можно использовать для задания областей и поиска событий, произошедших в заданных областях.

Исходные данные для программы

Данные в формате CSS 3.0

Основным форматом данных, с которыми работает программа, являются волновые формы в широко распространённом сейсмологическом формате CSS 3.0 [Anderson et al., 1990]. Программа способна воспринимать данные в любых подформатах этого формата. В программе реализован набор инструментов, позволяющий объединять данные из нескольких файлов, выбирать и загружать для обработки нужные фрагменты. Возможны сохранение обработанных данных в том же самом формате, перекомпоновка файлов.

Интерфейс к базе данных волновых форм

В 2016 г. в КоФ ФИЦ ЕГС РАН была разработана система хранения волновых форм «Волноед». Она содержит структурированную базу данных волновых форм и программные средства для записи произвольных данных в эту базу. Эти программные средства способны конвертировать записи в произвольных сейсмологических форматах в формат «Волноед». Таким образом, база данных волновых форм пополняется и упорядочивается как в реальном времени, так и ретроспективно.

Структурно данные, находящиеся в базе «Волноед», подобны данным в формате CSS 3.0. Разница состоит в том, что имена файлов жёстко стандартизированы для автоматизации доступа, файлы находятся в папках с жёстко стандартизированными именами, а сами данные запакованы специфическим образом.

Программа LOS имеет интерфейс к данным, находящимся в этой базе. Пользователю достаточно задать интересующий его интервал времени и выбрать нужные станции. Программа, выполняя запрос, сформирует список каналов и загрузит его в программу. Дальше с данными «Волноед» можно работать так же, как и с данными в формате CSS 3.0.

Данные в дисковых кольцевых буферах формата UniDL

Кольцевые дисковые буферы (disk loops) – структуры данных, предназначенные для временного хранения оперативно поступающей информации и последовательного замещения старой информации вновь поступающей.

Формат UniDL был разработан в КоФ ФИЦ ЕГС РАН для кратковременного хранения сейсмологических и инфразвуковых данных, поступающих по различным каналам в виде квантовок (целочисленных отсчётов) с равномерными (одинаковыми для данных одного канала) шагами по времени. В настоящее время все данные, поступающие в КоФ ФИЦ ЕГС РАН, попадают в UniDL-буферы, откуда автоматически переписываются в базу данных «Волноед» для постоянного хранения.

Программа LOS имеет интерфейс для доступа к данным таких буферов. Пользователь выбирает нужные буферы, их каналы объединяются. Задаётся интервал времени, и данные из этих буферов поступают на обработку. Возможно сохранение данных буферов в формате CSS 3.0.

Подсистема универсального доступа к данным

В настоящее время разрабатывается подсистема доступа к данным в популярных сейсмологических форматах. Она будет включена в новые версии программы LOS. На первом этапе будут реализованы конверторы из данных в форматах CSS 3.0, Seed и miniSeed, GCF (Guralp) и «Байкал» в формат базы данных «Волноед». Также будут восприниматься формат дигитайзеров RefTek и форматы передачи данных по электронной почте с помощью AutoDgm.

Инструменты обработки данных

В программе реализованы следующие инструменты анализа и обработки данных.

Фильтрация. Пользователь задаёт полосу частот и полуширину окна фильтрации. Фильтрованная запись заменяет исходную. Реализован «откат», т.е. возвращение к исходной записи.

Замер амплитуды и периода. В заданном пользователем коротком интервале времени программа измеряет амплитуду и период (как по одной компоненте, так и по трёхкомпонентной записи в целом). Реализованы пересчёты из смещений в скорости и ускорения и обратно.

Построение сонограмм. Спектрограмма (сонограмма) — изображение, показывающее зависимость спектрального состава сигнала от времени. На горизонтальной оси представлено время, по вертикальной оси — частота. Третье измерение с указанием амплитуды на определённой частоте в конкретный момент времени представлено интенсивностью или цветом каждой точки изображения.

В программе LOS для любых каналов данных можно включить сонограммы, которые отображаются совместно с волновыми формами (рис. 2). Алгоритм построения быстрый, поэтому сонограмму можно в реальном времени масштабировать и перемещать по экрану вместе с записью.

Анализ поляризации. Работает для записей трёхкомпонентных сейсмостанций. Пользователь выбирает фрагмент трёхкомпонентной записи, программа вычисляет кросскорреляци-

онную матрицу, её собственные векторы, оценивает параметры линейности и плоскостности (rectilinearity and planarity), азимут и угол подхода для P -волны. Рассчитанный таким образом азимут может быть выведен на карту и использован как дополнительный параметр для локации сейсмического события.

Расчёт азимута и кажущейся скорости методом формирования пучка (beamforming). Пользователь задаёт фрагмент записи сейсмической группы. Программа осуществляет суммирование каналов с различными сдвигами в зависимости от азимута и скорости, по максимуму суммы определяет азимут на событие и кажущуюся скорость прихода волны. Азимут может быть выведен на карту и использован как дополнительный параметр для локации сейсмического события.

Формирование пучка (beamforming) может производиться в трёх вариантах — для сейсмических волн (диапазон кажущихся скоростей 2.5–50 км/с), для инфразвуковых волн (от 0.25 до 1.7 км/с) и общий, применяемый, когда неясно, волна какого типа анализируется (от 0.25 до 50 км/с).

Анализ азимутов и кажущихся скоростей приходов инфразвуковых волн. Для поиска инфразвуковых событий обычно используются зависящие от предполагаемого азимута подхода события α и кажущейся скорости ν функции кросс-корреляции каналов.

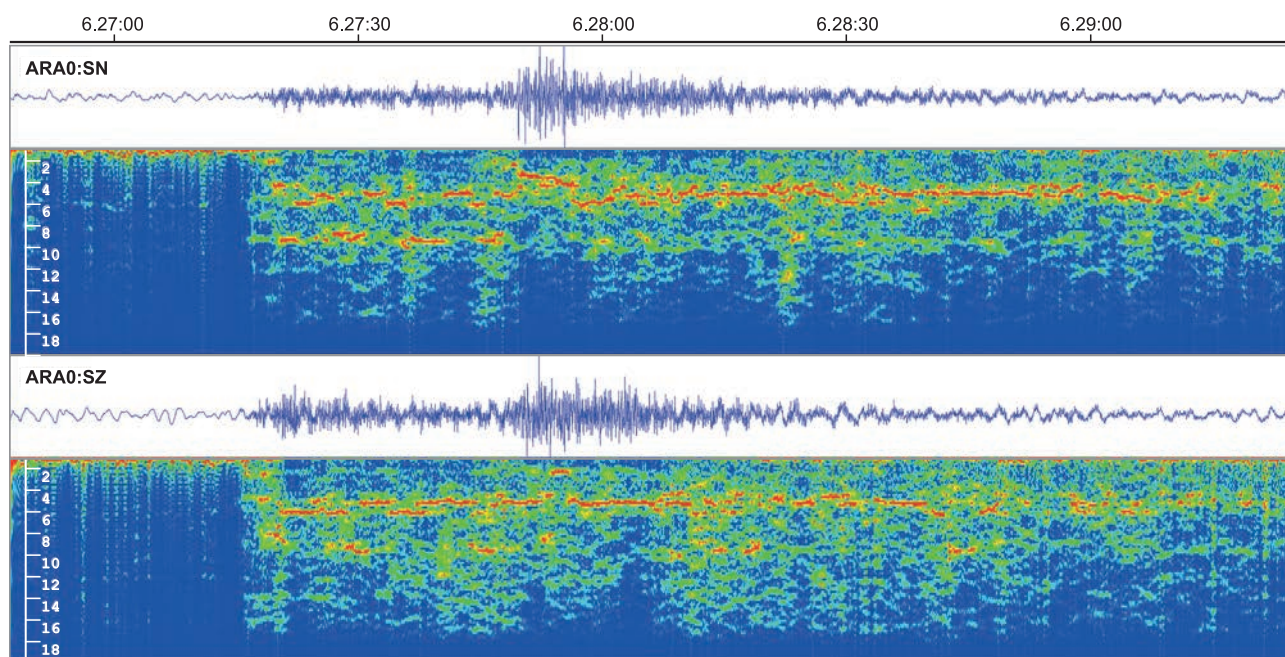


Рис. 2. Построение сонограмм в программе LOS.

Характерный вид сонограммы нередко позволяет выявить взрывную природу сейсмического события

Функции рассчитываются для некоторого временного интервала $[t_0, t_1]$. При расчёте значений этих функций записи по каждому каналу сдвигаются на время, зависящее от предполагаемых угла и скорости подхода события, а затем коррелируются между собой. Эта функция кросс-корреляции (далее – $R(\alpha, v, t_0, t_1)$) является рейтинговой для обнаружения инфразвуковых событий, – чем больше значение этой функции, тем больше вероятность того, что на данном временном интервале записано событие, пришедшее с азимута α со скоростью v .

Для интерактивного анализа инфразвуковых данных в КоФ ФИЦ ЕГС РАН была разработана программа VARPLOT, позволяющая отображать значения этой рейтинговой функции при фиксации тех или иных параметров [Асминг и др., 2009]. Функционал, ранее реализованный в VARPLOT, был полностью интегрирован в программу LOS.

Встроенная в LOS процедура VarPlot позволяет отображать значения трёх функций в зависимости от времени:

$$R_0(\alpha, t) = R(\alpha, v = \text{const}, t - h/2, t + h/2);$$

$$R_1(\alpha, t) = \max_v R(\alpha, v, t - h/2, t + h/2);$$

$$R_2(\alpha, t) = \max_\alpha R(\alpha, v, t - h/2, t + h/2).$$

Здесь h – ширина временного окна, в котором считается кросс-корреляция. Функция R_0 отражает изменение азимута на сигнал во времени при условии, что кажущаяся скорость постоянна. Функция R_1 отражает изменение азимута при наилучшей скорости, а R_2 – поведение скорости при наилучшем азимуте (рис. 3).

Подсистема локации сейсмических событий

Скоростные модели

Программа LOS позволяет использовать для локации сложные скоростные модели, которые могут быть составлены из одномерных (горизонтально-слоистых) скоростных моделей, каждая из которых актуальна на своём участке территории (в контуре). Для расчёта времён пробега по путям, проходящим через несколько контуров,

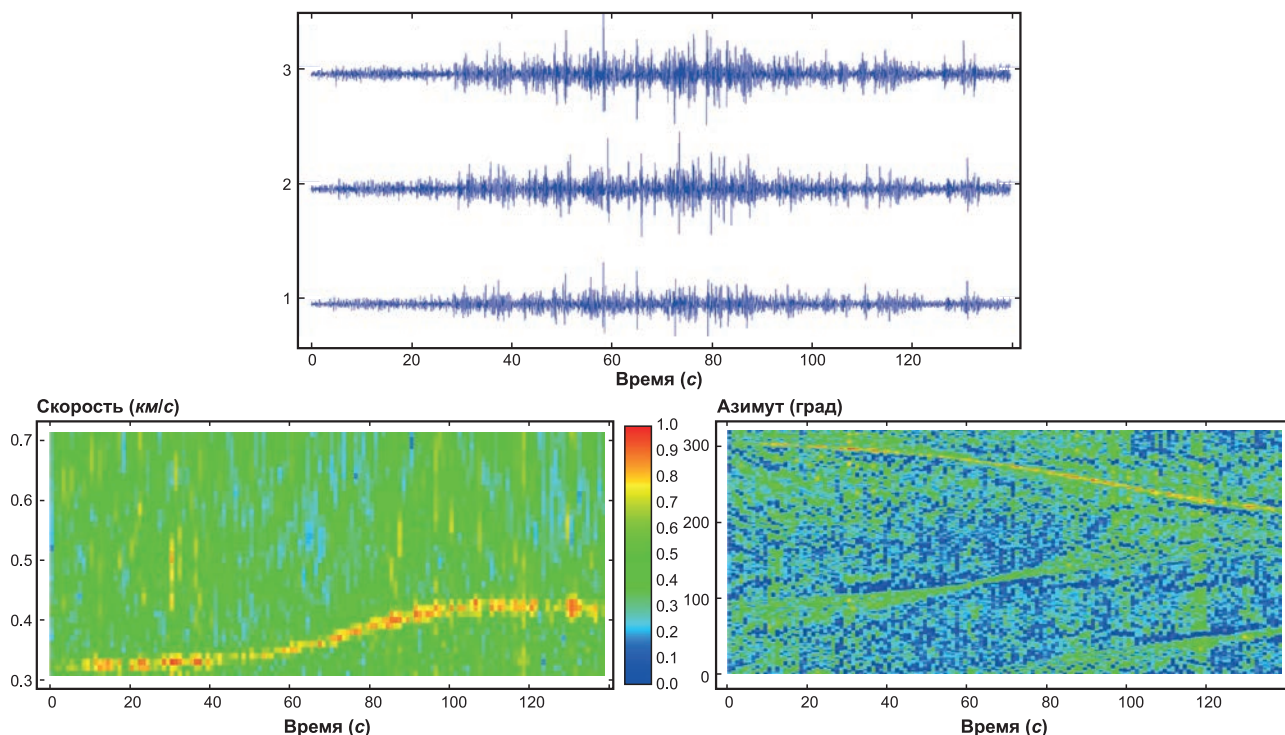


Рис. 3. Работа подсистемы VarPlot. Вверху – исходная запись инфразвукового сигнала тремя микробарографами. В середине – отображение цветами значений функции R_2 , красный цвет соответствует наиболее достоверной оценке кажущейся скорости.

Внизу – отображение цветами значений R_1 .

Красный цвет соответствует наиболее достоверной оценке азимута.
Легко видеть, что сигнал порождён движавшимся объектом

используется регионализация по Бондарю [Bondar et al., 1998; Xiaoping, 2001]. Таблицы времён пробега считаются автоматически при загрузке моделей в программу.

Второй тип – скоростные модели для отдельных станций. Это таблицы «псевдоскоростей» (отношений расстояния к времени пробега), которые заранее насчитываются программой 3D-моделирования (например, программой «Сейсмоконфигуратор» [Асминг и др., 2013]). Эти модели имеют более высокий приоритет по сравнению с горизонтально-слоистыми моделями. Для них не применяется регионализация по Бондарю.

Пример регионализации для северо-западного региона, используемой для локации событий в КоФ ФИЦ ЕГС РАН, показан на рис. 4.

Использование рельефа

В программу может быть загружена модель рельефа на определённых участках территории. Рельеф задаётся в виде набора прямоугольных сеток – высот с равными шагами по широте и долготе. Рельеф служит для отбраковки нереалистических вариантов локации сейсмических событий. Сетки высот могут порождаться отдельной утилитой RLF, которая способна комбинировать информацию о рельефе из различных источников, полученную в виде отдельных точек с высотами, сеток и изолиний.

Алгоритмы локации сейсмических событий

Локация событий в LOS производится по временам приходов сейсмических волн P и S на датчики, которые определяются оператором или автоматическими системами обработки данных. При наличии поляризационных азимутов или азимутов по сейсмическим группам, эти азимуты также могут быть использованы процедурами локации.

Формально постановку задачи локации можно сформулировать так.

Пусть имеется набор сейсмостанций с координатами (φ_i, λ_i) (φ – широта, λ – долгота, i – индекс станции). На них в моменты времени t_i пришла сейсмическая волна, для простоты рассматриваем одну волну, всё нижеследующее тривиально обобщается на две волны. На некоторых из станций также могут быть определены один или несколько азимутов на источник, которые обозначим как α_{ij} , где i – индекс станции, j – индекс типа азимута. Необходимо определить координаты (φ, λ) и, по возможности, глубину h источника.

Большинство алгоритмов локации, включённых в программу LOS, являются модификациями и комбинациями двух базовых алгоритмов – минимизации невязки времени в очаге и поиска на сетке. Для визуализации к ним добавлен метод засечек. Для локации событий в сложных

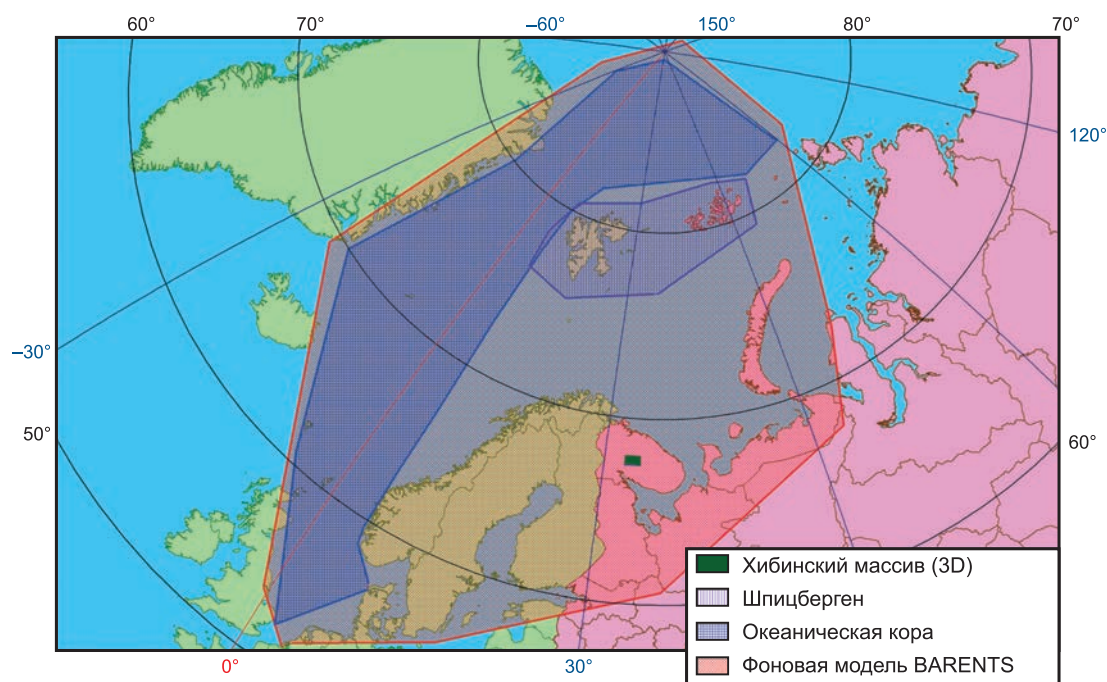


Рис. 4. Предварительная карта регионализации северо-западного региона.

Используются три одномерных скоростных модели – для районов Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа и модель для платформы BARENTS. Для Хибинского массива используется трёхмерная модель.

трёхмерных средах с учётом рельефа может быть применён алгоритм локации на стохастическом графе.

Метод засечек

Метод засечек – общеизвестный визуальный метод локации сейсмических событий. В программу LOS он включён для того, чтобы интерпретатор мог наглядно оценить корректность определения приходов *P*- и *S*-волн.

Когда для одной станции известны времена приходов фаз *P* и *S*, можно (зафиксировав глубину) построить линию, с каждой точки которой волны *P* и *S* пришли бы на данную станцию именно с наблюдаемой разницей во времени. Другими словами, это линия, в одной из точек которой и произошло искомое событие. Если скоростная модель одномерна (т.е. времена пробегов зависят только от расстояния между точками), эта линия представляет собой окружность. Если модель не одномерна, линия может иметь более сложную форму. Нарисовав несколько таких «окружностей», можно приблизительно определить координаты события в точке их пересечения.

Кроме таких «окружностей» *P–S*, в программе реализован другой тип линий засечек – линии *P–P*. Пусть на станцию 1 волна *P* пришла в момент времени T_1 , а на станцию 2 – в момент времени T_2 . По временам T_1 и T_2 можно (зафиксировав глубину) построить линию, на которой должна лежать точка, в которой произошло событие. Есть $T_1 = T_2$ – это прямая, проходящая посередине между станциями, если $T_1 < T_2$, линия будет напоминать гиперболу, проходящую ближе к станции 1. Аналогично можно построить линии *S–S* для любой пары станций, на которых есть замеры времён приходов *S*-волн.

Базовый алгоритм 1 – минимизация невязки оценки времени в очаге

Будем обозначать $TT(\varphi_1, \lambda_1, h_1, \varphi_2, \lambda_2, h_2)$ – время пробега рассматриваемой сейсмической волны между точками $(\varphi_1, \lambda_1, h_1)$ и $(\varphi_2, \lambda_2, h_2)$.

Выберем произвольно точку (φ, λ, h) и предположим, что это та точка, в которой произошло сейсмическое событие. Для каждой *i*-й станции можно оценить время, когда произошло событие (время в очаге):

$$t_{0i} = t_i - TT(\varphi_i, \lambda_i, 0, \varphi, \lambda, h).$$

Если событие действительно произошло в точке (φ, λ, h) , все t_{0i} должны совпасть и дать истинное время в очаге. Чем дальше точка будет от очага, тем больше будет разброс оценок t_{0i} .

В качестве меры невязки обычно берут среднеквадратичное отклонение, рассчитанное по всем

оценкам времён в очаге $\sigma(\varphi, \lambda, h)$. Это функция трёх переменных, координат и глубины. Найдя точку, в которой эта функция достигает минимума, мы найдём локацию сейсмического события.

При расчёте среднеквадратичного отклонения используются веса приходов фаз на станции. Пусть w_i – вес *i*-го прихода (эти веса по-разному используются в разных модификациях алгоритма, о чём будет сказано ниже).

Оценка времени в очаге по *i*-му приходу равна:

$$t_{0i}(\varphi, \lambda, h) = t_i - TT(\varphi_i, \lambda_i, 0, \varphi, \lambda, h).$$

Общая оценка времени в очаге:

$$\bar{t}_0(\varphi, \lambda, h) = \sum_i (w_i \cdot t_{0i}) / \sum_i w_i.$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma(\varphi, \lambda, h) = \sqrt{\sum_i [w_i \cdot (\bar{t}_0 - t_{0i})] / \sum_i w_i}.$$

Очевидно, среднеквадратичное отклонение имеет размерность времени.

Если для локации нужно использовать также азимуты, необходимо дополнить невязку $\sigma(\varphi, \lambda, h)$ невязкой азимутов.

Введём обозначения:

- $A_i(\varphi, \lambda)$ – азимут из *i*-й станции в точку (φ, λ) ;
- $\|\alpha - \beta\|$ – разность между двумя углами;
- E_j – типичная ошибка азимута *j*-го типа (задается пользователем);
- W_j – цена ошибки *j*-го азимута в единицах секунда/градус.

Параметры W_j также задаются пользователем. Их размерность – секунды/градус. Они нужны, чтобы свести невязку азимута к невязке времени.

Окончательно невязка азимута запишется как:

$$\Delta\alpha(\varphi, \lambda) = \frac{\sum_i \sum_j (w_j \cdot \|A_i(\varphi, \lambda) - \alpha_{ij}\|) / E_j}{\sum_{ij} 1/E_j}.$$

Эта величина также имеет размерность времени. Окончательно, в случае наличия информации об азимутах, минимизируется функция $\sigma(\varphi, \lambda, h) + \Delta\alpha(\varphi, \lambda)$.

Минимизация в базовом алгоритме производится только по координатам, глубина *h* фиксируется. Выполняется она простым методом, так называемой «ромашкой». Из стартовой точки, которая может быть задана пользователем, делаются шаги равной длины по всем азимутам через 30 или 45 градусов. После каждого шага вычисляется значение невязки σ в точке, куда мы шагнули.

Окончательно выбирается точка с наименьшим значением σ , из которой, в свою очередь, опять делаются такие же шаги, и т.д. Процесс повторяется до тех пор, пока такие шаги уменьшают значение σ .

Когда поиск с данным шагом заканчивается, шаг уменьшается, и поиск минимума продолжается. Шаг может уменьшаться несколько раз. Параметры последовательных «ромашек» — длина шага в километрах и шаг по углу азимута в градусах, — задаются в конфигурационном файле программы.

Функция $\sigma(\varphi, \lambda, h)$ оказывается очень удобной для оценки доверительной области локализации. Доверительная область вместо точки истинной локализации возникает из-за того, что важные для локализации величины известны неточно. Во-первых, времена приходов волн на станции измеряются с ошибками. Будем обозначать интервал этих ошибок $[-\Delta t_{\text{onset}}, +\Delta t_{\text{onset}}]$. Другими словами, будем считать, что ошибки измерения времён прихода с некой большой вероятностью (скажем, 95%) лежат в этом интервале. Во-вторых, скоростная модель, которой мы пользуемся для расчёта времён пробега, также неточна. Будем считать, что если кажущаяся скорость, согласно модели, равна v , то с той же большой вероятностью (95%) истинная кажущаяся скорость лежит в интервале $[v-\Delta v, v+\Delta v]$.

Итак, если погрешность скорости равна Δv , расстояние от события до станции равно r , то неопределённость, которую вносит эта погрешность в оценку времени в очаге, равна:

$$\Delta t_{\text{speed}} = \frac{r}{v} - \frac{r}{v + \Delta v} \approx \frac{r \cdot \Delta v}{v^2},$$

а общая неопределённость, которую вносят в i -ю оценку времени в очаге совместно неопределённости измерения времени прихода и скорости, равна:

$$\Delta t_i = \sqrt{\Delta t_{\text{onset}}^2 + \left(\frac{r_i \cdot \Delta v}{v^2}\right)^2}.$$

Эти неопределённости, в свою очередь, вносят вклад в оценку $\sigma(\varphi, \lambda, h)$:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_i (w_i \cdot \Delta t_i)^2 / \sum_i w_i}.$$

Таким образом, все точки пространства, для которых выполняется неравенство:

$$\sigma(\varphi, \lambda, h) - \sigma_{\text{min}} \leq \sigma_0,$$

можно считать равнозначными, в принципе, способными быть координатами лоцируемого события. В случае наличия азимутов эти рассуждения элементарно обобщаются.

Программа LOS численно решает это неравенство и аппроксимирует область ошибок эллипсом.

Базовый алгоритм 2 — поиск на сетке

Данный алгоритм основан на идее Generalized Beamforming, высказанной в [Kvaerna, Ringdal, 1996]. Он также выполняется при фиксированной глубине. Вокруг точки предварительной локализации события (или просто некой исходной точки) генерируется круг, в котором собственно и будет производиться поиск. Этот большой круг покрывается маленькими кругами, которые и составляют сетку поиска (рис. 5).

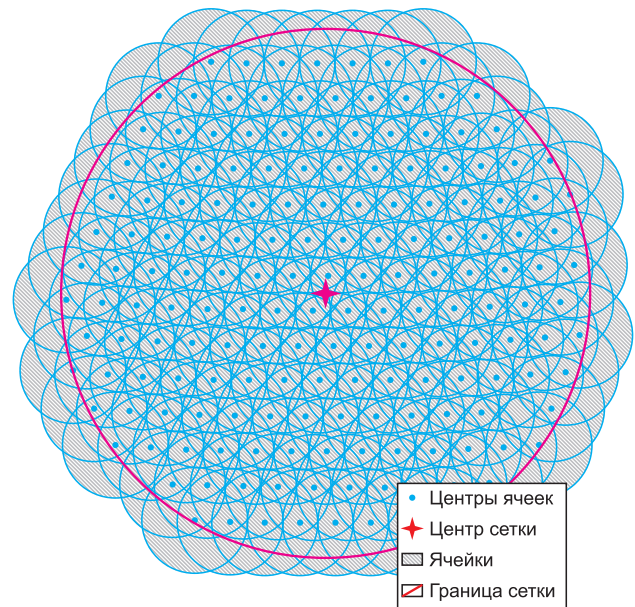


Рис. 5. Сетка вокруг исходной точки локализации

Поиск производится в несколько итераций. На каждой итерации для каждой ячейки сетки рассчитывается рейтинг — оценка гипотезы, что событие произошло именно в данной ячейке (о расчёте рейтинга сказано ниже). Затем из сетки выбрасывается 3/4 ячеек с наименьшими рейтингами, а оставшиеся ячейки делятся, каждая на четыре меньших. Процесс повторяется. В конечном итоге центр ячейки с самым большим рейтингом на последней итерации принимается за результат локализации.

Рассмотрим оценку рейтинга отдельных ячеек. Он проиллюстрирован рис. 6.

Если событие произошло в проверяемой ячейке, то волна добежит до i -й станции за время

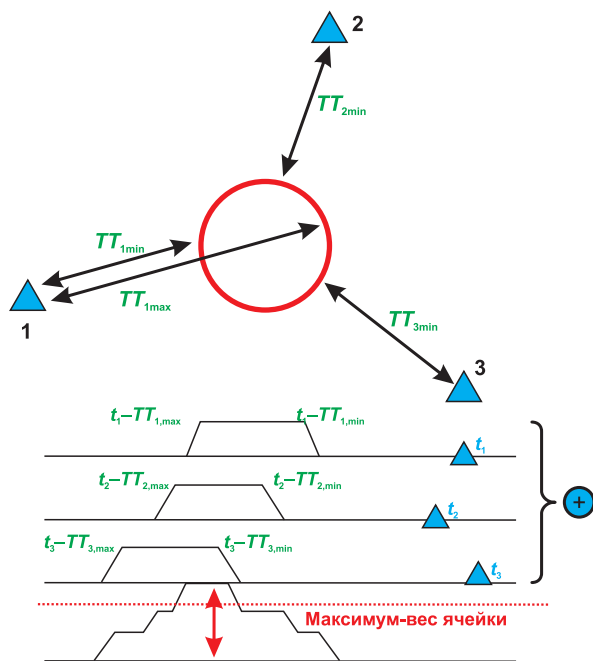


Рис. 6. Оценка рейтинга ячейки

из диапазона $[TT_{i,min}, TT_{i,max}]$ (здесь TT – время пробега). Пусть фаза пришла на i -ю станцию в момент времени t_i . Это значит, что событие произошло в интервале $[t_i - TT_{i,max}, t_i - TT_{i,min}]$. Если для всех фаз эти интервалы пересекаются, значит, событие могло произойти в данной ячейке.

Поэтому для получения рейтинга ячейки каждую фазу сносим назад по временной оси, превращаем в прямоугольник в интервале $[t_i - TT_{i,max}, t_i - TT_{i,min}]$. Прямоугольник трансформируем в трапецию, добавив «скосы», т.е. запасы для учёта неточностей скоростной модели и измерений времён вступлений (рис. 7). Все получившиеся

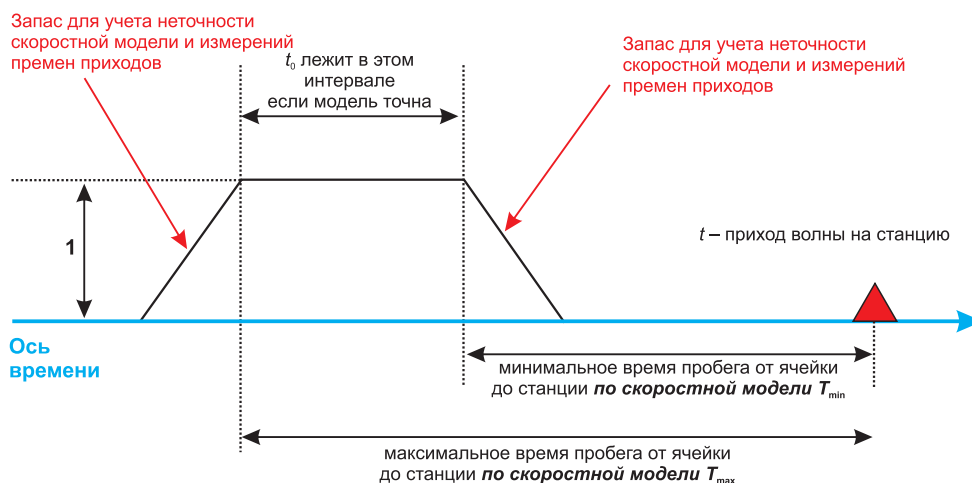


Рис. 7. Генерация вклада фазы в оценку рейтинга ячейки

трапеции складываем. Максимум суммы и даёт оценку нашей гипотезы.

Этот метод локации работает немного медленнее, чем метод минимизации невязки, однако он обладает очень большим преимуществом – если какая-либо фаза (время вступления сейсмической волны) определена с большой ошибкой, она просто не внесёт вклада в оценку рейтинга нужной ячейки, т.е. вообще не повлияет на результат локации.

Комбинированные методы локации

В программе LOS два описанных выше базовых метода локации могут быть применены в различных комбинациях.

1. Локация минимизацией невязки при фиксированной глубине.

Это самый простой и быстрый вариант локации, который применим в большинстве случаев, поскольку глубины рудничных событий, как правило, невелики.

2. Комбинация локации методами минимизации невязки и поиска по сетке при фиксированной глубине.

В этом варианте сначала выполняется алгоритм минимизации невязки. Минимизация начинается из точки, заданной пользователем. Все веса вступлений волн w_i принимаются равными 1.

На втором этапе выполняется алгоритм поиска по сетке. За центр круга, в котором ведётся поиск, принимается результат локации на предыдущем этапе.

На третьем этапе опять выполняется алгоритм минимизации невязки, за начало принимается результат локации на предыдущем этапе. Отличие от первого этапа в том, что веса вступлений

волн определяются по результатам алгоритма поиска по сетке, т.е. веса нереалистических вступлений обращаются в 0, а веса маловероятных становятся меньше 1. По результатам этого этапа вычисляется эллипс ошибок.

Этот вариант работает лишь немного медленнее предыдущего, поэтому по выбору пользователя он применяется в случаях, когда есть сомнения в оценках некоторых времён вступлений (например, если при локации минимизацией получилась слишком большая невязка).

3. Локация методом минимизации невязки с глубинами.

Алгоритм применяется для набора фиксированных глубин, для каждой глубины h_i вычисляется оптимальная для данной глубины невязка $\sigma_i = \sigma_{\text{opt}}(h_i)$. Среди всех σ_i выбирается минимальная σ_{min} , которая соответствует некой оптимальной глубине h_{best} .

Как и в случае определения координат событий, при определении глубины существует интервал неопределённости, все глубины из которого могут в реальности соответствовать используемым для локации временам приходов волн. Для всех $\sigma(h)$ из этого интервала должно выполняться неравенство:

$$\sigma(h) - \sigma(h_{\text{best}}) < \sigma_0,$$

Программа LOS определяет интервал возможных глубин $[h_0, h_1]$, внутри которого лежит оптимальная глубина h_{best} .

Поскольку любая глубина из этого интервала может оказаться реальной, возникает вопрос, какую из этих глубин выбрать для окончательной оценки широты и долготы события. Этот вопрос не решается в рамках алгоритмов, поэтому в программе предусмотрено два варианта на выбор пользователя. Первый вариант – в качестве окончательной оценки глубины выдаётся h_0 . Это связано с тем, что, как правило, события, происходящие на рудниках и в их окрестностях, мелкофокусные. Второй вариант – выбор оптимальной глубины h_{best} .

4. Комбинация локации методами минимизации невязки и поиска по сетке с перебором глубин.

Для набора предопределённых глубин h_i выполняется алгоритм, описанный в п. 2, – применяется сначала минимизация невязки, потом поиск по сетке, потом минимизация невязки с модифицированными весами. Как и в предыдущем пункте, для каждой из глубин вычисляется оптимальная невязка, затем проводится оценка интервала возможных глубин.

Этот алгоритм вычислительно наиболее трудоёмок, однако он наиболее надёжен для локации событий с существенной глубиной.

Алгоритм локации в стохастическом графе

В данном алгоритме трёхмерная проводящая сейсмическая среда заменяется стохастическим графом. Это набор вершин – точек, случайным образом «высыпанных» в интересующую нас область Земли, и рёбер – связей между ними. Пустоты (выработанные объёмы породы) в среде характеризуются отсутствием вершин. Для каждой пары точек по скоростной модели рассчитываются времена пробега волн по прямой. Они принимаются за расстояния между вершинами в стохастическом графе.

Программа LOS не располагает средствами генерации стохастических графов. Граф может быть создан в программе «Сейсмоконфигуратор» [Асминг и др., 2013] и загружен в LOS.

Локация производится методом инверсии времён приходов волн. Пусть мы имеем времена приходов волны на N станций – t_i . Тогда, если T_i – времена пробега волны от источника до i -й станции, для всех станций величины $t_i - T_i$ совпадают и равны времени, когда произошло событие.

Переходя из среды в стохастический граф, можем сказать, что для вершины графа, наиболее близкой к результату локации величины $T_i - t_i$, где теперь T_i – время пробега от i -й вершины (приёмника) до проверяемой вершины, для всех i должны быть близки между собой, то есть их дисперсия минимальна.

Для локации события N раз применяется алгоритм Дейкстры (расчёт кратчайшего пути в графе из исходной вершины во все остальные) [Dijkstra, 1959], за начальную точку поочередно берётся каждый приёмник (i), а за начальное время – инвертированное время прихода волны $-t_i$. В каждой вершине графа по результатам счёта накапливаются дисперсии времён. По окончании процесса ищется вершина с минимальной дисперсией. Вершины с дисперсией, отличающейся от минимальной на заданную величину, формируют трёхмерную область ошибок (рис. 8).

Сценарии локации

В программе LOS предусмотрено использование так называемых сценариев локации. Сценарий – это именованный набор параметров, управляющий ходом работы алгоритмов локации и выдачей результатов. Несколько сценариев готовится заранее и описывается в конфигурационном файле программы. Конкретный сценарий выбирает пользователь во время работы в зависимости от типа лоцируемого события.

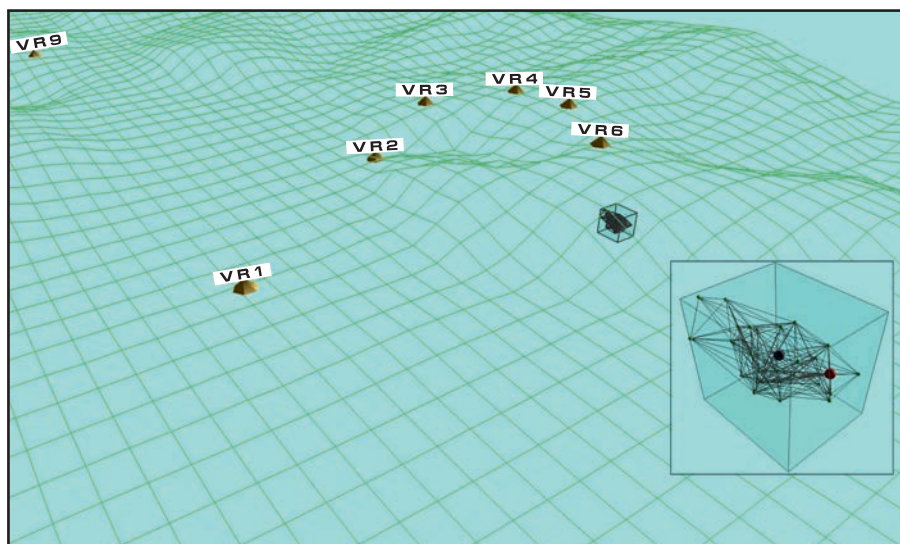


Рис. 8. Локация события с помощью стохастического графа.

Показаны рельеф, станции, доверительная область локации (параллелепипед). На врезке доверительная область локации показана детальнее – отображены вершины графа с дисперсией, близкой к оптимальной, и связи между ними

Так, для локации с глубинами в сценарии прописываются следующие параметры:

- диапазон глубин для перебора;
- правило, по которому определяется результирующая глубина.

На последнем остановимся подробнее. При локации всегда существует и оценивается в программе такая невязка σ_0 , что все h , удовлетворяющие неравенству $\sigma(h) < \sigma_0$, являются равновероятными оценками глубины. Другими словами, результатом локации является не одна глубина, а интервал равновероятных глубин $[h_0, h_1]$, внутри которого лежит точка h_{best} , на которой $\sigma(h)$ достигает минимума. Имеются две опции – выдать в качестве окончательной оценки глубины значение h_{best} (что разумно при обработке землетрясений) или h_0 , если есть подозрение, что лоцируемое событие является взрывом, т.е. произошло близко к дневной поверхности.

Алгоритмы распознавания типов событий

После выполнения процедуры локации программа вычисляет амплитуды объёмных волн P и S по станциям, определённым в конфигурационном файле. В случае превышения отношением амплитуд S и P некоторого порогового значения пользователю выдаётся подсказка, что, возможно, событие имеет естественное происхождение.

В следующие версии программы планируется добавить расчёт прочих критериев различения природных и техногенных событий, таких как параметр изменчивости спектра, обобщён-

ные огибающие и т.д. [Годзиковская и др., 2010]. Будет реализована некая машина вероятностного вывода (байесовский «наивный» классификатор или байесовская сеть доверия) для интерактивной классификации сейсмических событий.

База данных сейсмических событий

Ранее в КоФ ФИЦ ЕГС РАН была разработана структура баз данных сейсмических событий, связанная с волновыми формами. В ней к волновым событиям прикреплялись карточки с метайнформацией (координатами, временами и т.д.). Был разработан и реализован в программе ELRESS язык запросов к таким базам данных.

В программе LOS был реализован тот же самый язык запросов. Результаты поисков могут быть представлены в виде таблиц или вынесены на карты. По картам можно проводить вторичный поиск, т.е. искать события, произошедшие в какой-либо области.

Генератор отчётов

Генератор отчётов – подсистема программы LOS, которая по базам данных сейсмических и инфразвуковых событий автоматически может создать документ (в формате HTML или DOC), содержащий тексты, карты и таблицы с информацией о событиях, найденных в базах.

В LOS реализован метаязык, на котором описывается структура отчёта, карт, таблиц, связь таблиц с параметрами базы данных, критерии выборки событий.

Отчёт в формате HTML формируется непосредственно программой. Отчёт в формате DOC формируется в редакторе Word, которым программа управляет с помощью технологии OLE Automation.

Заключение

Программа LOS вошла в практику рутинной обработки данных Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН, практически полностью заменив использовавшиеся ранее программы ряда EL (EL_WIN, ELRESS) в работе, связанной с уточнением результатов автоматической локации, ручной локации наиболее важных событий, а также в анализе инфразвуковых сигналов.

Планируется дальнейшее развитие программы. В следующие версии будет включён универсальный конвертор, позволяющий работать с данными в произвольных сейсмологических форматах, экспорт данных в формате miniSeed, база данных, не связанная с волновыми формами, набор критериев, используемых для дискриминации событий различных типов, и машина вероятностного вывода, позволяющая по этим критериям оценить принадлежность сейсмического или инфразвукового события к определённому типу.

Литература

Асминг В.Э. Программный комплекс для автоматизированной обработки сейсмических записей «EL» // Приборы и методика геофизического эксперимента. — Мурманск: Изд-во ООО «МИП-999», 1997. — С. 125–132.

Асминг В.Э. Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона: дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. — М.: ИДГ РАН, 2004. — 272 с.

Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Прокудина А.В. Моделирование сейсмической локации в трёхмерных средах // Вестник МГТУ. — 2013. — Т. 16, № 4. — С. 644–649.

Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируе-

мых техногенными источниками // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12, № 2. — С. 512–518.

Годзиковская А.А., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А. Ретроспективный анализ первичных материалов по сейсмичности Кольского полуострова и прилегающих территорий в XX веке. — М.: Ваш полиграфический партнёр, 2010. — 130 с.

Евтюгина З.А., Асминг В.Э. О регистрации падения болида 16.11.2017 г. инфразвуковыми станциями севера Европы // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. — С. 99–102.

Anderson J., Farrell W., Garcia K., Given J., Swanger H. CSS Version 3 Database: Schema Reference Manual // Tech. Rep. C90-01. — Science Applications International Corporation, 1990.

Asming V., Prokudina A. System for automatic detection and location of seismic events for arbitrary seismic station configuration NSDL // ESC 2016-373, 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 4-10 September, 2016.

Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. — 1959. — V. 1. — P. 269–271.

Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V. Automated seismic monitoring system for the European Arctic // Seismic Instruments. — 2019. — V. 55, N 1. — P. 17–23.

Kværna T., Ringdal F. Generalized beamforming, phase association and threshold monitoring using a Global Seismic Network // Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences). Vol. 303 / E.S. Husebye, A.M. Dainty (eds.). — Springer, Dordrecht, 1996.

Morozov A.N., Vaganova N.V., Shakhova E.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., Antonovskaya G.N., Evtjugina Z.A. Seismicity of the Arctic in the early Twentieth century: Relocation of the 1904–1920 earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2019. — V. 109, N 5. — P. 2000–2008.

Xiaoping Y., Bondar I., McLaughlin K., North R. Source specific station corrections for regional phases at Fennoscandian stations // Pure and Applied Geophysics. — 2001. — V. 158. — P. 35–57.

Сведения об авторах

Асминг Владимир Эрнестович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Кольского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Апатиты, Россия. E-mail: asmingve@mail.ru

Федоров Андрей Викторович, канд. физ.-мат. наук, директор КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: andrey_v_fedorov@inbox.ru

Прокудина Анжелика Валентиновна, инженер 1 кат. КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: prolika@mail.ru

The program LOS for interactive seismic and infrasonic data processing

© 2021 V.E. Asming, A.V. Fedorov, A.V. Prokudina

KoD GS RAS, Apatity, Russia

Received December 14, 2020

Abstract For many years, the Kola Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences carries out work on testing and implementation of modern techniques and algorithms for seismic and infrasonic data processing and event location. The KoD staff has developed several original algorithms that appeared to be useful for seismic and infrasonic event location and discrimination. In 2020, the LOS program was created. The most efficient tools for data processing and analysis, event location algorithms have been united in the program. The program also contains a modern mapping system and database. The following tools have been implemented: bandpass and adaptive filtration, polarization analysis and backazimuth computation for 3C stations, computation of backazimuths, and apparent velocities for seismic and infrasonic arrays (beamforming). To analyze records of infrasonic arrays the program has a cross-correlation tool, which enables to observe changes of signal's backazimuths and apparent velocities in time. For seismic event location, the program uses two basic algorithms: minimization of origin time estimation residual and grid search based on generalized beamforming approach. These algorithms can be used in different combinations depending on the location scenario selected by a user. In addition, a new location algorithm based on a presentation of the seismic medium in a form of random graph where vertices correspond to points in the medium and edges are wave paths between the points, has been implemented. It can be useful for locating events in a substantially heterogeneous media, possibly with voids and cavities, as well as for taking into account the relief. This algorithm can be used, in particular, when locating events in mines using local mine seismic networks. The LOS program has been put into the practice of the Kola Division.

Keywords seismology, acoustics, program, signal processing, seismic location, infrasound, infrasonic array.

For citation Asming, V.E., Fedorov, A.V., & Prokudina, A.V. (2021). [The program LOS for interactive seismic and infrasonic data processing]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(1), 27-40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02>

References

- Anderson, J., Farrell, W., Garcia, K., Given, J., & Swanger, H. (1990). CSS Version 3 Database: Schema Reference Manual. *Tech. Rep. C90-01*. Science Applications International Corporation.
- Asming, V., & Prokudina, A. (2016). System for automatic detection and location of seismic events for arbitrary seismic station configuration NSDL. In *35th General Assembly of the European Seismological Commission. (ESC 2016-373)*.
- Asming, V.E. (1997). [Software complex for automated processing of seismic records EL]. In *Pribory i metodika geofizicheskogo eksperimenta* [Devices and methods of geophysical experiment] (pp. 125-132). Murmansk, Russia: MIP-999 Publ. (In Russ.).
- Asming, V.E. (2004). [Programming complex for automatization of detection, location and interpretation of the seismic events and its application for the study of the seismicity of the North-Western region. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, Russia: IDG RAS Publ., 272 p. (In Russ.).
- Asming, V.E., Evtiugina, Z.A., Vinogradov, Yu.A., & Fedorov, A.V. (2009). [The analysis of infrasound signals produced by technogenic sources]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 12(2), 512-518 (In Russ.).
- Asming, V.E., Vinogradov, Yu.A., & Prokudina, A.V. (2013). [Modeling of seismic location in 3D media]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 16(4), 644-649 (In Russ.).
- Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271.
- Evtiugina, Z.A., & Asming, V.E. (2018). [On registration of a bolide crash on November 16, 2017 by infrasound stations in Northern Europe]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh*

dannykh” [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop “Modern methods of processing and interpretation of seismological data”] (pp. 99-102). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Fedorov, A.V., Asming, V.E., Evtyugina Z.A., & Prokudina, A.V. (2019). Automated seismic monitoring system for the European Arctic. *Seismic Instruments*, 55(1), 17-23.

Godzikovskaia, A.A., Asming, V.E., & Vinogradov, Yu.A. (2010). [Retrospective analysis of primary data on the seismicity of the Kola Peninsula and adjacent territories in the XX century]. Moscow, Russia: Vash poligraficheskii partner Publ., 130 p. (In Russ.).

Kværna, T., & Ringdal, F. (1996). Generalized beamforming, phase association and threshold monitor-

ing using a Global Seismic Network. In: *Husebye E.S., Dainty A.M. (eds.). Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences)*, 303. Springer, Dordrecht.

Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Shakhova, E.V., Konechnaya, Y.V., Asming, V.E., Antonovskaya, G.N., & Evtyugina, Z.A. (2019). Seismicity of the Arctic in the early Twentieth Century: Relocation of the 1904–1920 earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 2000–2008.

Xiaoping Y., Bondar, I., McLaughlin, K., & North, R. (2001). Source Specific Station Corrections for Regional Phases at Fennoscandian Stations. *Pure and Applied Geophysics*, 158, 35-57.

Information about authors

Asming Vladimir Ernestovich, PhD, Leading Researcher of the Kola Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KoD GS RAS), Apatity, Russia. E-mail: asmingve@mail.ru

Fedorov Andrey Viktorovich, PhD, Director of the KoD GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: andrey_v_fedorov@inbox.ru

Prokudina Anzhelika Valentinovna, Engineer of the KoD GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: prolika@mail.ru