

УДК 550.34.01:519.245:004.436

В.Э. Асминг, Ю.А. Виноградов, З.А. Евтюгина

Калибровка скоростной модели Хибинского горного массива и прилегающей территории с помощью регистрации промышленных взрывов

V.E. Asming, Yu.A. Vinogradova, Z.A. Evtyugina

Calibration of the Khibiny Massif velocity model using registration of industrial explosions

Аннотация. Мониторинг геодинамической активности Хибинского массива подразумевает как можно более точную локацию сейсмических событий, происходящих здесь. Для этого необходимы, с одной стороны, знания о скоростях сейсмических волн в массиве и прилегающих территориях и, с другой стороны, программные инструменты для локации событий в неоднородных средах. Разработанная в КФ ГС РАН программа "Сейсмоконфигуратор" позволяет создавать скоростные модели трехмерных сред, лоцировать в них события, а также рассчитывать кажущиеся скорости пробега волн по различным путям. В результате регистрации промышленных взрывов в Хибинах с помощью сети постоянных и временных сейсмостанций получены значения кажущихся скоростей Р-волны на множестве путей от источников к станциям, пересекающих Хибинский массив. По этим данным с помощью программы "Сейсмоконфигуратор" подобраны двух- и трехмерные скоростные модели, удовлетворяющие наблюдениям. Предложен способ модификации имеющейся системы локации событий для практического использования этих моделей.

Abstract. Monitoring of geodynamic activity of the Khibiny Massif assumes an accurate location of seismic events occurring here. This requires on the one hand knowledge of seismic wave velocities in the massif and adjacent territories and on the other hand software tools for seismic location in inhomogeneous media. The Seismic Configurator program developed in the Kola Branch of Geophysical Survey of RAS enables to create velocity models of 3D media, locate events and compute apparent velocities of seismic waves propagating along different paths. As a result of registration of industrial explosions in Khibiny, a set of apparent velocities of P-waves along paths crossing the massif has been obtained. 2D and 3D velocity models matched the observations have been fitted by these data using the Seismic Configurator program. A method of modification of the existing location system for practical usage of the models has been proposed.

Ключевые слова: сейсмическая локация, сеть сейсмостанций, скоростная модель, моделирование, Хибинь

Key words: seismic location, seismic network, velocity model, modeling, Khibiny

1. Введение

В Мурманской области более восьми десятилетий разрабатываются месторождения апатит-нефелиновых руд. В результате добычи сырья открытым и подземным способами значительно изменился рельеф поверхности и напряженное состояние Хибинского горного массива. Перераспределение напряжений, связанное с проходкой горных выработок в хрупких высокопрочных породах, вызывает динамические проявления горного давления в виде выбросов пород, обрушений и горных ударов. Для контроля напряженного состояния массива и, следовательно, обеспечения безопасности работ в сложных условиях разработки и эксплуатации месторождений целесообразно применение сейсмического метода.

В настоящее время ОАО "Апатит" проводит мониторинг сейсмической активности Хибин (и их окрестностей) с помощью объединенной системы контроля состояния массива – ОСКСМ (*Аккуратов и др.*, 2011). В результате совместной работы локальных сейсмосетей ОАО "Апатит" и сети Кольского филиала Геофизической службы Российской академии наук (КФ ГС РАН) можно оценить геодинамическую обстановку в Хибинском горном массиве и прилегающих территориях в режиме времени, близком реальному. Однако в пятидесятикилометровой зоне производственной деятельности ОАО "Апатит" точность локации сейсмических событий – километр и более – существенно ниже, чем в зоне подземных рудников – десятки метров. Одним из способов уменьшения ошибок локации является уточнение используемой скоростной модели.

Для калибровки скоростной модели Хибинского массива промышленные взрывы, произведенные на руднике Восточный (карьеры Ньюрпахк, Коашва) и Центральный, регистрировались постоянными и временными сейсмостанциями КФ ГС РАН, а также сейсмосетями ОАО "Апатит". В результате анализа полученных данных с помощью программы "СейсмоКонфигуратор", разработанной в КФ ГС РАН

(Асминг и др., 2013), были подобраны двух- и трехмерная модели Хибинского массива минимальной сложности, правдоподобно объясняющие наблюдаемые аномалии скоростей сейсмических волн.

2. Экспериментальные работы по уточнению скоростной модели Хибинского массива

Шесть промышленных взрывов, произведенных с 21.11 по 05.12 2013 г. на рудниках Восточный (карьеры Ньюрпахк, Коашва – четыре взрыва) и Центральный регистрировались постоянными и временными сейсмостанциями КФ ГС РАН и сейсмостями ОАО "Апатит" (сеть сейсмостанций Расвумчоррского и Кировского рудников). Каждый из этих взрывов также регистрировался в Ловозерском массиве (рис. 1) постоянной станцией международной сети наблюдения (LVZ), принадлежащей консорциуму IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology).

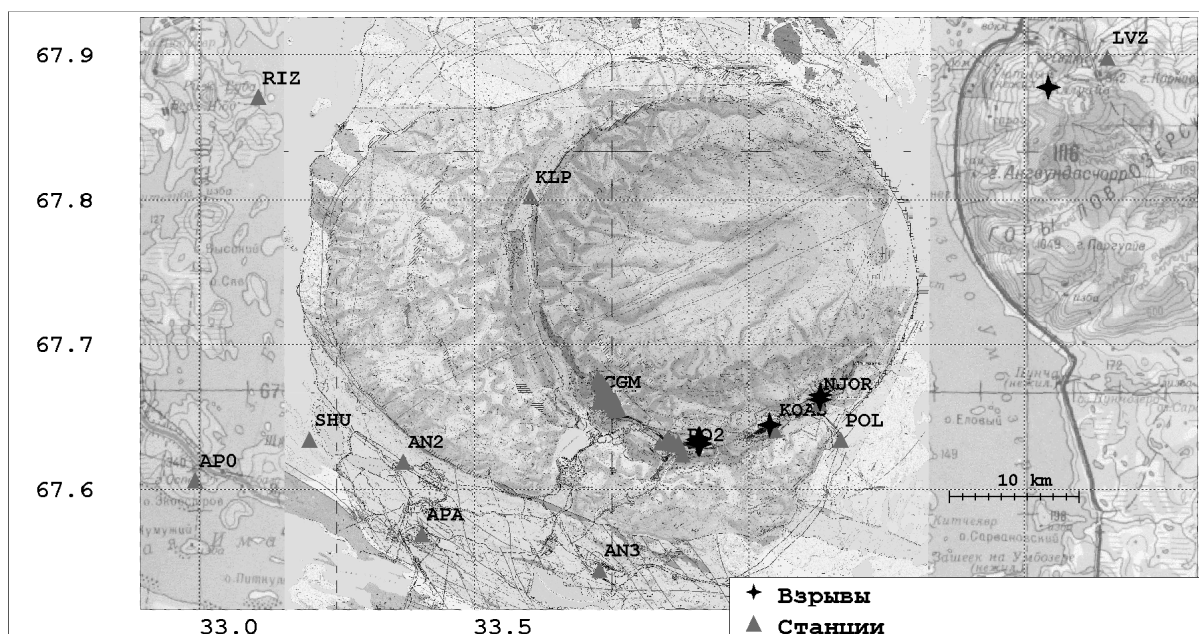


Рис. 1. Расположение постоянных (AP0 и APA, сети рудников ОАО "Апатит") и временных сейсмостанций, а также мест взрывов

Для определения точного времени инициации промышленных взрывов одна из временных сейсмостанций устанавливалась максимально близко к месту подрыва: KOAS, NJOR, POL, PO2.

Анализ полученных данных проводился по следующей схеме: оценивались погрешности измерения времен приходов волн на станции, рассчитывались кажущиеся скорости пробега волн по различным путям "источник – станция".

Для каждого взрыва по одной или нескольким ближайшим станциям оценивалось время в очаге, рассчитывались кажущиеся скорости пробега Р-волн от источника до станций. Для расчета скоростей использовались только те станции, на которых четко видны первые вступления волн. Если время в очаге или время вступления не удавалось рассчитать точно, оценивался интервал, в который попадали кажущиеся скорости. Кроме взрывов ноября – декабря 2013 г. был использован калибровочный взрыв в Ловозерском массиве, проведенный 10 сентября 2002 г. Результаты его регистрации были аккуратно переобработаны.

В качестве примера рассмотрим взрыв на Восточном руднике, карьер Ньюрпахк, 21.11.2013 г. Координаты взрыва 67.66495, 34.12959. Для регистрации времени в очаге использовалась мобильная станция POL, которая располагалась на расстоянии 3.762 км от места взрыва. Время прихода Р-волны на POL: 8.58:32.45 ± 0.025. Поскольку скорость волны на данном участке точно не известна, можно оценить диапазон времен пробега, исходя из "вилки" возможных для данного места скоростей. Считая, что данная скорость находится в диапазоне от 5.5 до 6.2 км/сек, получаем диапазон времен пробега от 0.61 до 0.68 сек. Соответственно, время в очаге лежит в интервале от 8.58:31.745 до 8.58:31.865 UTC. Затем были определены времена приходов сейсмических волн на станции. Необходимо отметить, что вступления волн оказались нечеткими, поэтому даже для опытного интерпретатора было непонятно, где именно брать вступление. Поэтому для некоторых станций оценивалось не одно время прихода, а диапазон времен, как это показано для взрыва в карьере Ньюрпахк (табл. 1).

Таблица 1. Времена приходов Р-волны на станции

Станция	Мин. время	Макс. время	Разница (сек)
CGM	8.58:34.610	8.58:34.660	0.050
AN3	8.58:35.280	8.58:35.280	
SHU	8.58:38.270	8.58:38.370	0.10
POL	8.58:32.430	8.58:32.430	
APA	8.58:36.850	8.58:36.960	0.110
AP0	8.58:39.470	8.58:39.610	0.140
LVZ	8.58:37.150	8.58:37.250	0.10

По диапазонам времен в очаге и диапазонам времен приходов можно рассчитать кажущиеся скорости Р-волн (табл. 2).

Таблица 2. Кажущиеся скорости Р-волн

Станция	Скорости по поздним приходам		Скорости по ранним приходам	
	CGM	5.845	6.096	5.947
AN3	6.123	6.338		
SHU	5.952	6.062	6.043	6.157
POL	5.492	6.658		
APA	6.229	6.375	6.363	6.516
AP0	6.169	6.264	6.281	6.38
LVZ	6.166	6.304	6.281	6.423

В целом кажущиеся скорости Р-волн для четырех взрывов на руднике Восточный оказались заметно выше, чем скорости, полученные в результате работ по калибровке сейсмостетей ОАО "Апатит": 5.74 км/сек – для станций ОАО "Апатит"; 6.12 – для станции APA и 6.2 – для станции AP0 (Аккуратов и др., 2011). Превышение кажущейся скорости Р-волн для взрывов в карьерах Коашва и Ньюкпах говорит о том, что скоростная модель среды в зоне Восточного рудника нуждается в корректировке.

Для выработки скоростной модели Хибинского массива и прилегающих территорий уместно привести результаты калибровочного взрыва в Ловозерском массиве. 10 сентября 2002 г. при участии ОАО "Севермет" было взорвано 2 т взрывчатого вещества в заброшенной штольне в точке с координатами 67.8775N, 34.5438E (GPS). Для точной отметки момента взрыва в непосредственной близости (на расстоянии 300 м) была установлена станция GBV 316B. Скорость Р-волны в верхнем слое в непосредственной близости от источника была измерена сотрудником Горного института КНЦ РАН С.А. Козыревым. Время взрыва: 10.09.2002 8.29:13.93 ± 0.05 сек. Взрыв был зарегистрирован станциями Апатиты (APA) и Апатитский ARRAY (AP0). По данным станций в Апатитах, взрыву соответствовало сейсмическое событие с магнитудой 1.7. Моменты приходов волн на станции: APA P = 2002/09/10 8.29:23.7130; AP0 P = 2002/09/10 8.29:25.6880.

Учитывая погрешность оценки времени в очаге, получаем для станции APA диапазон скоростей от 6.00 до 6.06 км/сек, а для AP0 – от 6.1 до 6.15 км/сек.

3. Выработка скоростной модели Хибинского массива и прилегающих территорий

Под скоростной моделью будем понимать структуру, состоящую из объемных (или плоских, если подбирается двухмерная модель) тел с заданными в них скоростями сейсмических волн, привязанную географически к рассматриваемому участку местности.

Скоростную модель будем считать соответствующей наблюдениям, если рассчитанные по ней кажущиеся скорости по путям от источников взрывов до сейсмостанций окажутся между минимальными и максимальными значениями, полученными в результате обработки их записей (см. табл. 1 и 2). Скоростных моделей, соответствующих наблюдениям, может получиться много. Постараемся подобрать такую модель, которая соответствовала бы имеющимся представлениям о структуре Хибинского массива и окружающих территорий и была бы проста, то есть содержала минимальное количество элементов, необходимых для достижения согласия между модельными и экспериментальными значениями скоростей.

Основным инструментом подбора скоростных моделей в данной работе явилась программа "СейсмоКонфигуратор". Программа позволяет лоцировать сейсмические события в произвольных трехмерных средах и рассчитывать времена пробегов и кажущиеся скорости сейсмических волн через трехмерные среды. Под кажущейся скоростью здесь понимается отношение расстояния по прямой между источником и приемником ко времени пробега волны (Асминг и др., 2013).

Задавая координаты взрывов, мы трассировали сейсмическую волну в приемники, рассчитывали модельные кажущиеся скорости сейсмических волн и подбирали модель, согласующуюся с результатами экспериментов (рис. 2).

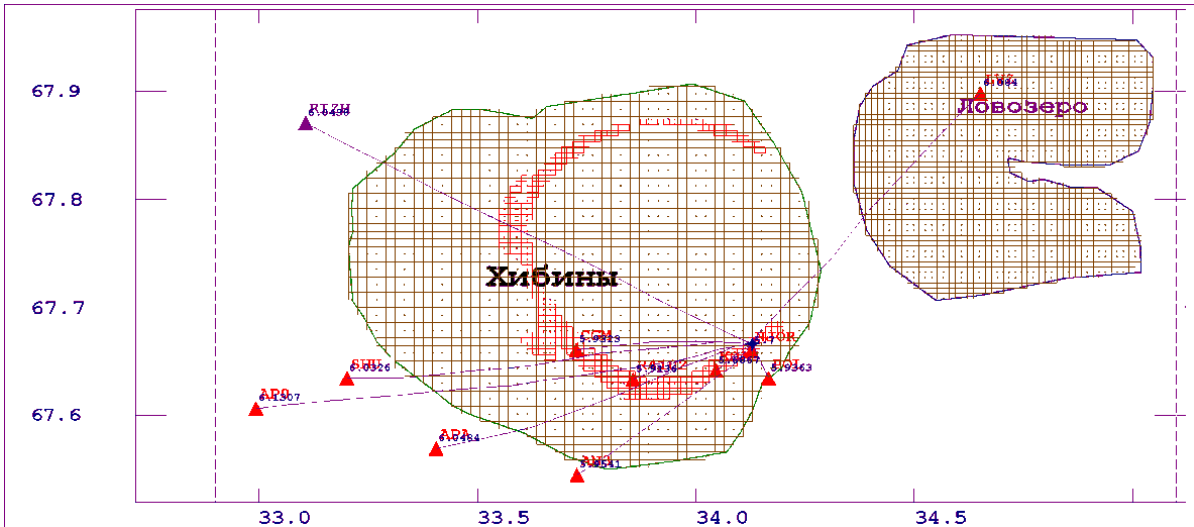


Рис. 2. Кажущиеся скорости для взрывов на Восточном руднике (карьер Ньоркпах)

Попытка подбора двумерной скоростной модели. Как известно, Хибинский и Ловозерский массивы представляют собой интрузии, в которых скорости сейсмических волн в целом ниже, чем в окружающей массивы среде. Среднее значение скорости Р-волны – 5.74 км/сек – в месторождениях апатито-нефелиновых руд Хибинского массива хорошо известно благодаря работам, выполненным при калибровке сейсмосетей ОАО "Апатит". В качестве исходной была принята плоская (без глубины) модель. Она была введена в программу "СейсмоКонфигуратор". Хибины здесь заданы контуром, скорость Р-волны в котором 6 км/сек, а в зонах месторождений – 5.7 км/сек. В среде, окружающей массив, скорость – 6.5 км/сек. Затем задавались точки, соответствующие взрывам, считались модельные кажущиеся скорости для путей от взрывов до станций и сравнивались со скоростями, полученными экспериментально.

Результаты моделирования и их сравнение с экспериментальными данными показали, что плоская модель адекватно работает почти везде, т.е. рассчитанные по ней кажущиеся скорости по путям от источников взрывов до сейсмостанций оказались между минимальными и максимальными значениями, полученными в результате обработки записей на станциях. Исключение – район Восточного рудника. Так, если для взрыва в карьере Коашва модель дает хорошее совпадение скоростей для станций Ловозеро и Риж-Губа (LVZ и RIZ), а также станций в Хибинах, то для станций АРА и АР0 (рис. 2) модельные скорости оказались несколько занижены (табл. 3).

Таблица 3. Кажущиеся скорости Р-волн для взрыва в карьере Коашва (экспериментальные значения и рассчитанные по двумерной модели)

Станция	Диапазон экспериментальных значений	Модельное значение
АРА	6.18-6.36	6.07
АР0	6.17-6.20	6.16

Подобную картину наблюдаем для взрыва на карьере Ньоркпах Восточного рудника (табл. 4). Модельные скорости для станций АРА, АР0 и LVZ ниже, чем скорости, полученные в результате обработки записей сейсмостанций (в табл. 2 – это диапазон экспериментальных значений).

Таблица 4. Кажущиеся скорости Р-волн для взрыва в карьере Ньоркпах (экспериментальные значения и рассчитанные по двумерной модели)

Станция	Диапазон экспериментальных значений	Модельное значение
АРА	6.23-6.52	6.13
АР0	6.16-6.38	6.13
LVZ	6.16-6.42	6.06

Полагаем, что волны, идущие из района рудника Восточный в направлении станций АРА и АР0, проходят некий более "скоростной" участок, который может быть учтен трехмерной моделью.

Попытка подбора скоростной трехмерной модели. Как было показано выше, подобранная двумерная ("плоская") скоростная модель работает адекватно везде, за исключением зоны Восточного рудника. Для того чтобы увеличить модельные скорости, необходимо иметь некие сведения о существовании в недрах более "скоростной" структуры. Некоторый намек на это можно найти в работе (Арзамасцев и др., 1998): "Восточный контакт массива... субвертикален до глубин 3-4 км с тенденцией к резкому выполаживанию на глубине 4-5 км".

Мы попытались смоделировать такое "выполаживание", задавая фрагмент Хибинского массива в виде объемного тела, состоящего из двух связанных контуров – большого сверху (внешний контур Хибин на плане рис. 3) и меньшего снизу – на глубине 2.5 км (внутренний контур на плане). Аналогично были заданы и рудные тела (рис. 3): первые большие две кривые – вид "дуги" сверху; вторые две кривые – контур "дуги" на глубине 2.5 км.

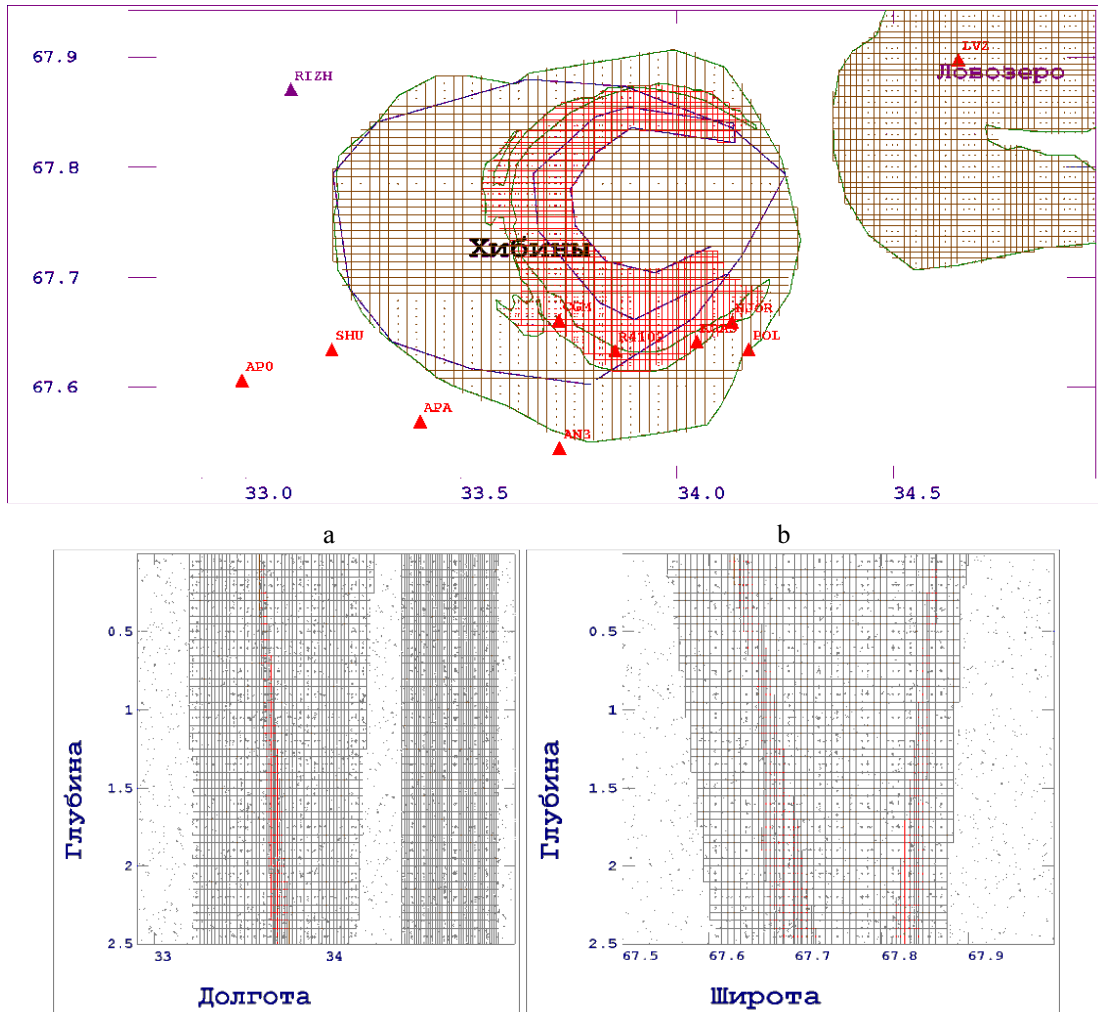


Рис. 3. Объемная модель: план и разрезы для точки с координатами 67.7N, 34.0E по долготе (а) и широте (b)

Приведем результаты расчета кажущихся скоростей по трехмерной модели для взрывов в карьерах Коашва (табл. 5) и Ньюрпахк (табл. 6). Кажущиеся скорости Р-волн от взрывов в этих карьерах Восточного рудника для станций АРА, АР0 и LVZ, рассчитанные по трехмерной модели, находятся в интервале скоростей, полученных экспериментально.

Таблица 5. Кажущиеся скорости Р-волн от взрыва в карьере Коашва (экспериментальные значения и рассчитанные по трехмерной модели)

Станция	Диапазон экспериментальных значений	Модельное значение
АРА	6.18-6.36	6.22
АР0	6.17-6.20	6.24

Таблица 6. Кажущиеся скорости Р-волн от взрыва в карьере Ньоркпахк (экспериментальные значения и рассчитанные по трехмерной модели)

Станция	Диапазон экспериментальных значений	Модельное значение
АРА	6.23-6.52	6.24
АРО	6.16-6.38	6.2
LVZ	6.16-6.42	6.14

Таким образом, трехмерная модель, лишь отчасти учитывающая глубинное строение массива, дает намного лучшие совпадения модельных и экспериментальных значений скоростей от взрывов в карьерах Коашва и Ньоркпахк, чем двумерная (плоская) модель.

О скоростях S-волн. К сожалению, на записях практически всех взрывов, записанных в ходе калибровки в ноябре – декабре 2013 г., не было четких вступлений S-волн. Вступления были "размазаны". Это обусловлено структурой взрыва: он производится не одновременно, а в несколько этапов. Неопределенность оценки времен S-волн достигала десятых долей секунды, что делает бессмысленным их использование для калибровки.

Тем не менее, использовать S-волну для локации во многих случаях бывает полезно. Разница времен приходов S- и Р-волн позволяет оценить расстояние до события при малом количестве сейсмостанций. Поэтому какая-то, пусть и не очень точная, модель для S-волны необходима.

При калибровке сети ОАО "Апатит" (ОСКСМ) в 2010 г. были рассчитаны эффективные скорости Р- и S-волн для событий на Кировском руднике и станций АРА, АРО и сети Кировского рудника. Отношения скоростей V_p/V_s очень близки (табл. 7) и в среднем составляют 1.79 (заметно больше теоретического значения $\sqrt{3} = 1.732$).

Таблица 7. Эффективные скорости Р- и S-волн для событий на Кировском руднике, оцененные на станциях АРА, АРО и Кировского рудника

Станция	V_p (км/сек)	V_s (км/сек)	V_p/V_s
Кировский рудник	5.7356	3.2	1.79
Апатиты (APZ9)	6.1178	3.397	1.80
Апатитская группа (АРО)	6.2022	3.4759	1.78

Близкие значения (1.76) получены для калибровочного взрыва в Ловозерском массиве и станций АРО и АРА. Поэтому достаточно рациональным подходом будет использование модели, в которой скорость S-волны получается делением скорости Р на заданную постоянную – 1.79.

4. Рекомендации применения трехмерной скоростной модели для локации событий

Для использования моделей такого типа необходима модификация программного обеспечения. Наиболее просто будет доработать программу, которая применяется для локации сейсмических событий в ЦГМ (Центр геодинамического мониторинга) ОАО "Апатит". Для каждой заданной станции, согласно имеющейся модели, можно рассчитать функции координат и глубины $V_p(\phi, \lambda, h)$ и $V_s(\phi, \lambda, h)$ – кажущиеся скорости при распространении волн из данной точки в станцию. Эти функции слабо меняются при изменении координат. Рассчитать их можно при помощи программы типа "СейсмоКонфигуратор", незначительно ее модифицировав.

Процедуру локации в ЦГМ можно будет проводить в два этапа. На первом этапе рассчитывать предварительные координаты события, используя некую усредненную скоростную модель, например, ту, которая используется в ЦГМ в настоящее время (постоянные кажущиеся скорости для каждой станции). Результат локации будет достаточно близок к истинному положению события (первые километры). По полученным координатам можно оценить значения $V_p(\phi, \lambda, h)$ и $V_s(\phi, \lambda, h)$. Поскольку между оценочной точкой и истинным положением события эти скорости изменятся слабо, достаточно будет произвести вторую локацию, используя эти оцененные скорости как постоянные.

5. Заключение

Проведен эксперимент по калибровке скоростных моделей Хибинского массива – постоянные и временные станции регистрировали промышленные взрывы. С помощью программы "СейсмоКонфигуратор" подбирали скоростную модель, которая согласуется с результатами экспериментов. Показано, что трехмерная (объемная) модель, учитывающая глубинное строение массива, дает лучшие совпадения модельных и экспериментальных значений скоростей от взрывов на руднике Восточный, чем двумерная (плоская) модель.

Даны рекомендации по обновлению программного обеспечения, применяемого в Центре геодинамического мониторинга ОАО "Апатит", для использования трехмерных моделей с целью уточнения сейсмической локации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме "Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации" (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

Литература

- Аккуратов М.В., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Корчак П.А.** Объединенная система контроля состояния Хибинского горного массива на базе сетей сейсмических станций Кольского филиала ГС РАН и ОАО "Апатит" // Мат. VI Междун. сейсмологической школы "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных". Обнинск, 2011. С. 7-10.
- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Глазнев В.Н., Раевский А.Б.** Глубинное строение и состав нижних горизонтов Хибинского и Ловозерского комплексов, Кольский полуостров: петролого-геофизическая модель. Петрология. 1998. Т. 6, № 5. С. 478-496.
- Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Прокудина А.В.** Моделирование сейсмической локации в трехмерных средах. Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 644-649.

References

- Akkuratov M.V., Asming V.E., Vinogradov Yu.A., Korchak P.A.** Ob'edinennaya sistema kontrolya sostoyaniya Hibinskogo gornogo massiva na baze setey seismicheskikh stantsiy Kolskogo filiala GS RAN i OAO "Apatit" [Joint monitoring systems of Khibiny mountain range on the basis of networks of seismic stations of the Kola Branch of GS RAS and JSC "Apatit"] // Mat. VI Mezhdun. seismologicheskoy shkolyi "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannyih". Obninsk, 2011. P. 7-10.
- Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V., Glaznev V.N., Raevskiy A.B.** Glubinnoe stroenie i sostav nizhnih gorizontov Hibinskogo i Lovozerskogo kompleksov, Kolskiy poluostrov: petrologo-geofizicheskaya model [Deep structure and composition of the subsurface of the Khibiny and Lovozero complexes, Kola Peninsula: Petrological and geophysical model]. Petrologiya. 1998. T. 6, N 5. P. 478-496.
- Asming V.E., Vinogradov Yu.A., Prokudina A.V.** Modelirovanie seismicheskoy lokatsii v trehmernyih sredah [Simulation of seismic location in three-dimensional media]. Vestnik MGTU. 2013. T. 16, N 4. P. 644-649.

Информация об авторах

Асминг Владимир Эрнестович – Кольский филиал Геофизической службы РАН, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, e-mail: asming@krsc.ru, asmingve@mail.ru

Asming V.E. – Kola Branch of Geophysical Survey (Kola Regional Seismological Centre – KRSC) of RAS, Cand. of Phys.-Math. Sci., Leading Researcher, e-mail: asming@krsc.ru, asmingve@mail.ru

Евтюгина Зинаида Анатольевна – Кольский филиал Геофизической службы РАН, канд. биол. наук, науч. сотрудник; Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии, доцент, e-mail: zina_evt@mail.ru, zina@krsc.ru

Jevtjugina Z.A. – Kola Branch of Geophysical Survey (Kola Regional Seismological Centre – KRSC) of RAS, Cand. of Biol. Sci., Scientist; MSTU Apatity Branch, Associate Professor of Geoecology Department, e-mail: zina_evt@mail.ru, zina@krsc.ru

Виноградов Юрий Анатольевич – Кольский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), канд. техн. наук, зам. директора, e-mail: yavin@mail.ru, vin@krsc.ru

Vinogradov Yu.A. – Kola Branch of Geophysical Survey (Kola Regional Seismological Centre – KRSC) of RAS, Cand. of Tech. Sci., Deputy Director, e-mail: yavin@mail.ru, vin@krsc.ru