

ВЛИЯНИЕ ТРАССЫ НА ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ КОРОТКОЗАМЕДЛЕННЫХ КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

В.В. Адушкин, А.А. Спивак

Приведены и обсуждаются результаты регистрации сейсмического эффекта карьерных массовых взрывов на предприятиях Курской магнитной аномалии. Получено существенное отличие в законах затухания сейсмического сигнала с расстоянием вдоль разных азимутов. В качестве основных факторов, определяющих амплитуду волны на удаленных расстояниях от источника, рассматриваются характеристики среды и глубина залегания границы Мохоровичича.

Введение

Значительные объемы горнодобывающего производства и, в частности, заметная доля открытых горных работ определяют высокую значимость проблемы воздействия массовых промышленных взрывов на окружающую среду. Действительно, взрывная отбойка горной массы является на сегодняшний день основной технологией добычи минерального сырья. Как показывает анализ современных исследований в области разработки новых технологий добычи полезных ископаемых, подобная ситуация в ближайшие десятилетия не изменится. При этом следует учитывать, что максимальные по массе используемого ВВ взрывы, наиболее сильно влияющие на локальную экологию, проводятся на карьерах (в условиях открытой разработки месторождений).

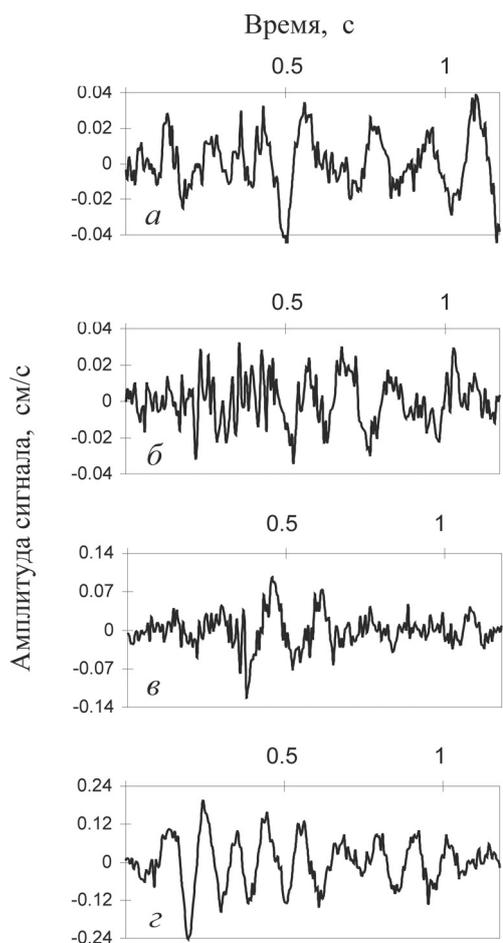
Постоянно ужесточающиеся требования к охране окружающей среды приводят к необходимости проводить детальный анализ геоэкологических эффектов массовых промышленных взрывов как с целью совершенствования технологий, так и снижения негативного влияния горнодобывающего производства на среду обитания. Наибольший интерес представляет сейсмический эффект массовых взрывов, который определяет целостность промышленных и жилых объектов [Адушкин и др., 2000].

В настоящей работе приведены результаты анализа сейсмического действия массовых карьерных взрывов в зависимости от азимута распространения сигнала и расстояния до точки наблюдения.

Сейсмический сигнал короткозамедленного взрыва на малых расстояниях

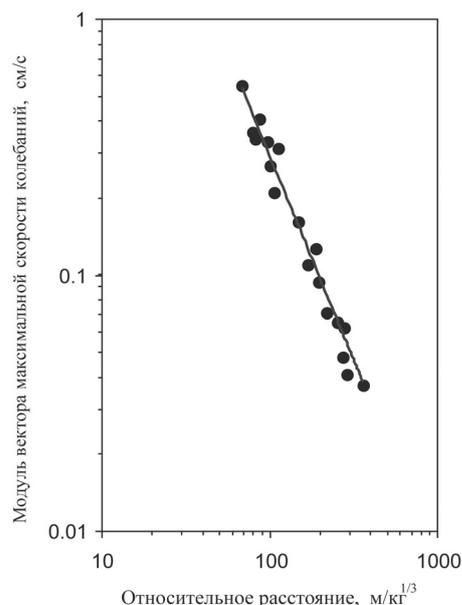
Специфика короткозамедленного взрывания зарядов на карьерах горнодобывающей отрасли определяет особенности сейсмического действия массового взрыва. Кумулятивный сейсмический эффект короткозамедленного взрыва складывается из сейсмических сигналов, вызванных взрывами отдельных скважин и групп скважин [Адушкин и др., 2000]. Отметим, что на практике вес заряда ВВ в отдель-

но взятой скважине составляет, как правило, 500–2000 кг [Спивак и др., 1998]. Как показывают натурные наблюдения сейсмический сигнал от такого взрыва имеет простую форму (рис. 1) и уверенно регистрируется над уровнем сейсмического фона до относительных расстояний $R/q^{1/3} \sim 300\text{--}400 \text{ м/кг}^{1/3}$, где q – масса заряда. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты измерений массовой скорости на разных расстояниях при взрыве в отдельно взятой скважине. Обращаясь к рис. 1, следует отметить, что при одинаковой структуре сейсмических сигналов, зарегистрированных на разных азимутах α , их волновая форма несколько отличается. Например, в отличие от направлений $\alpha \sim 90^\circ$ и $\alpha \sim 315^\circ$ в волновых формах сейсмических сигналов на азимутах $\alpha \sim 0^\circ$ и $\alpha \sim 45^\circ$ более ярко выделяется высокочастотная составляющая. Можно предполагать, что указанные отличия в формах сигналов объясняются влиянием трасс их распространения. Действительно, регистрация на азимутах 0 и 45° выполнялась в пунктах, расположенных на трассах, пересекающих участки ранее отбитых горных пород, характеризующиеся повышенной трещиноватостью массива. Регистрация на азимутах 315 и 90° выполнялась в пунктах, расположенных вблизи границы карьера, где массив был практически не нарушен взрывными работами.



▲ **Рис. 1.** Форма сейсмического сигнала (вертикальная компонента) на расстоянии 1 км, вызванного взрывом отдельной скважины. Пункты регистрации расположены на азимутах α ,^о: а – 315; б – 0; в – 45 и г – 90

▼ **Рис. 2.** Максимальный модуль вектора скорости колебаний грунта при взрывах в отдельных скважинах и малых групп скважин (Лебединский ГОК)



При одновременном подрыве двух и трех скважин (группа) форма сейсмического сигнала на расстояниях, превышающих 20 расстояний между скважинами, практически идентична форме сигнала при взрыве одиночной скважины. Также совпадают преимущественные частоты [Кишкина, Спивак, 1999].

Технология массового карьерного взрыва предусматривает отбойку горной массы отдельными блоками, расположенными на разных участках карьера. Время между подрывом очередных блоков может составлять от 1 до 10 с. Масса ВВ, используемая при отбойке одного блока, составляет 80–300 т. Отбойка каждого блока выполняется путем подрыва групп скважин, что приводит к существенно неравномерному в пространстве и времени выделению энергии взрыва.

Суммарный сейсмический сигнал массового карьерного взрыва представляет собой на малых расстояниях от карьера цуг отдельных сигналов разной амплитуды и длительности (рис. 3). Каждый такой сигнал соответствует взрыву отдельно взятого блока. При этом время прихода сигнала от конкретного блока в точку регистрации и его амплитуда на разных азимутах разная и определяется расстоянием от точки регистрации до блока. Вследствие этого, а также возможного расположения взрываемых блоков на одной линии с пунктом регистрации, форма кумулятивного сейсмического сигнала зависит от азимута (рис. 3).

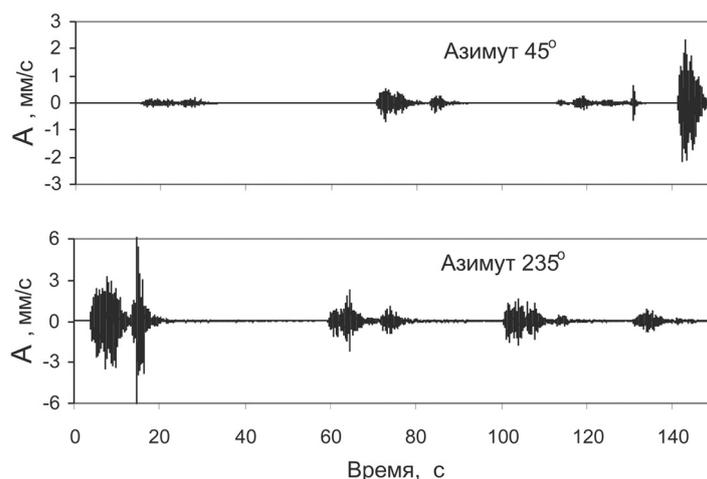


Рис. 3. Сейсмический сигнал от массового химического взрыва на карьере Лебединского ГОКа 23.09.2004 г., зарегистрированный в пунктах, расположенных на двух азимутальных направлениях

Сейсмический сигнал карьерного взрыва на больших расстояниях

По мере удаления от карьера сейсмический сигнал претерпевает значительные изменения вследствие рассеивания энергии, отражения и преломления волн на границах раздела сред, интерференции волн разного типа. В результате форма сейсмического сигнала, вызванного массовым взрывом, существенно изменяется с расстоянием: если на близких расстояниях хорошо выделяются цуги колебаний, связанных со взрывом отдельных блоков, то на больших расстояниях, превыша-

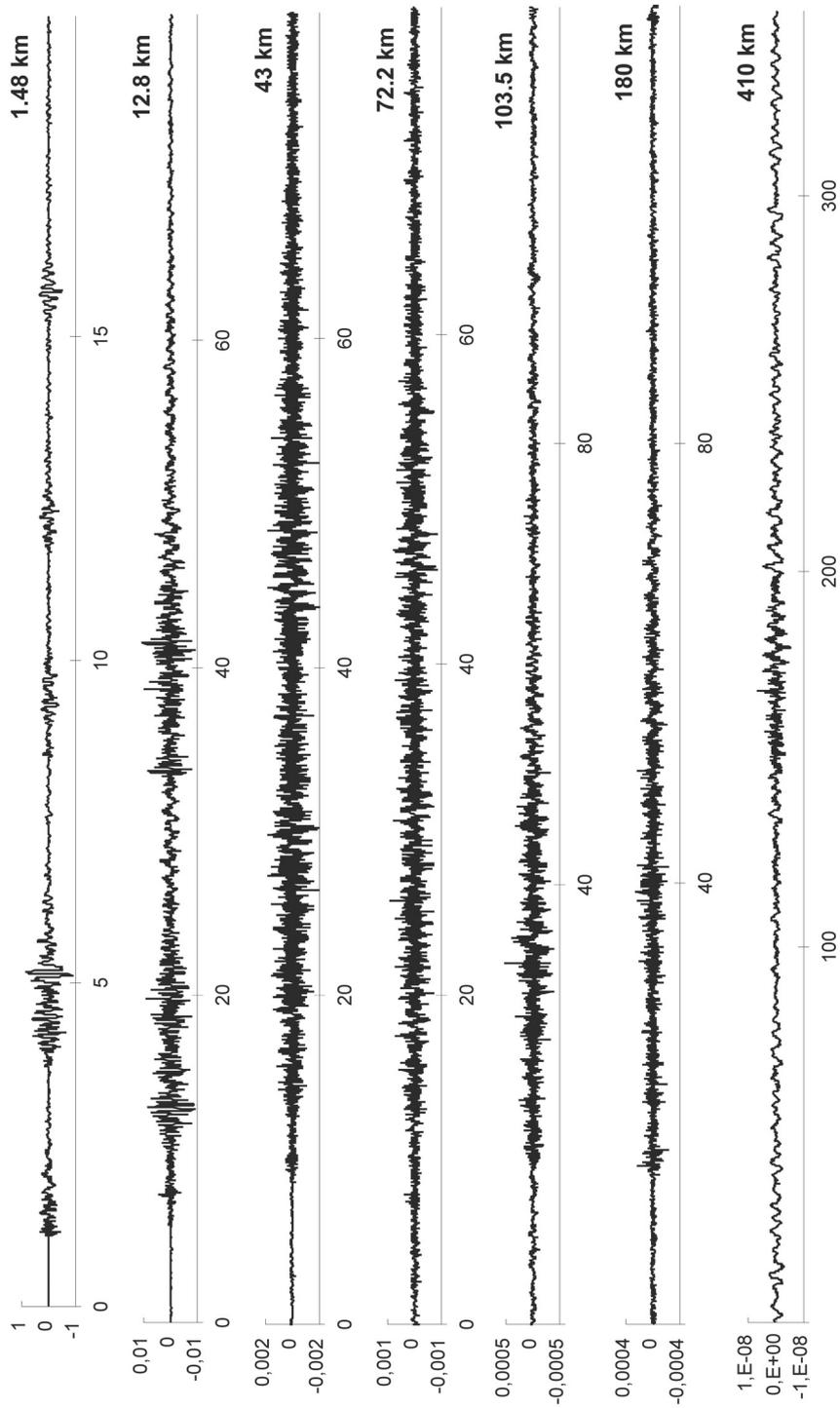


Рис. 4. Сейсмические сигналы массовых взрывов, зарегистрированные на разных расстояниях от источника

ющих 20–30 км, сигнал представляет собой единую волновую форму со сложной внутренней структурой (рис. 4). При этом в качестве основных характеристик сейсмического сигнала допустимо выбирать максимальную на данном расстоянии амплитуду и длительность сейсмических колебаний.

Амплитуда сигнала является наиболее важным параметром сейсмического воздействия массового взрыва. По этой причине исследование амплитудных характеристик, вызванных массовым взрывом сейсмических волн, представляет особый интерес. Схемы проведения массовых взрывов на карьерах весьма разнообразны. В каждом отдельном случае взрывается разное количество ВВ, разное количество блоков. Отбиваемые блоки располагаются на разных участках карьера и характеризуются разными размерами и соответственно разным количеством взрываемых скважин.

При обобщении данных, полученных при взрывах, выполненных по разным схемам, важно правильно выбрать пространственный масштабный фактор. Традиционно при описании сейсмических волн взрывного происхождения для характеристики удаленности точки наблюдения от источника используется относительная величина $R = r/q^{1/3}$, где r – абсолютное эпицентральное расстояние от взрыва в м, q – масса заряда ВВ в кг. В случае короткозамедленного взрыва большого количества скважин в качестве величины q , как показал анализ, выполненный в работе [Адушкин и др., 2000], выбирается масса одновременно взрываемого заряда (масса ВВ в группе скважин). В этой же работе показано, что в качестве наиболее устойчивой характеристики амплитуды сейсмического сигнала в широком диапазоне расстояний от источника (вплоть до 2300 км) допустимо выбрать максимальный модуль вектора скорости колебаний

$$V = \text{Max} \left\{ \sqrt{\sum_i v_i^2} \right\},$$

где v_i – компоненты скорости колебаний в сейсмическом сигнале в момент времени t_i .

В дальнейшем для характеристики амплитуды на разных расстояниях от взрывного источника примем соотношение, традиционно используемое при анализе взрывных сигналов [Адушкин, Спивак, 2007]:

$$V = \frac{A}{(r/q^{1/3})^n}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где r – эпицентральное расстояние до центра взрывного источника (м), q – в соответствии с данными работы [Адушкин и др., 2000] – максимальная масса одновременно взрываемого заряда ВВ (вес ВВ в группе скважин, кг), A – размерный коэффициент, величина которого определяется характеристиками используемого ВВ и условиями взрыва, в частности, характеристиками взрываемых горных пород, n – параметр, характеризующий степень затухания сигнала с расстоянием и зависящий от строения и свойств среды вдоль трассы его распространения.

Для построения зависимости (1) анализировались результаты сейсмической регистрации, выполненной на разных расстояниях от карьеров Лебединского, Стойленского и Михайловского ГОКов. Регистрация выполнялась в пунктах оперативной регистрации, развернутых вдоль разных азимутов. Общая схема расположения пунктов регистрации приведена на рис. 5.

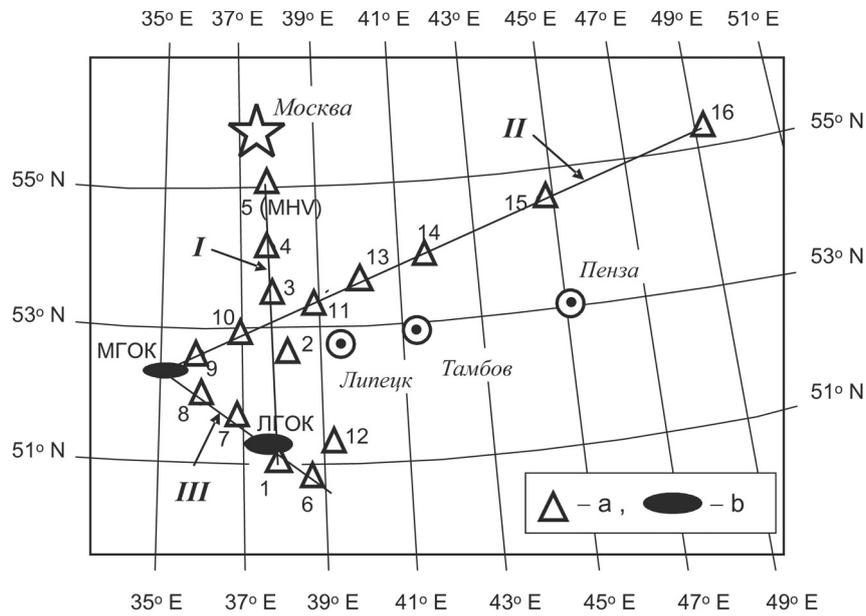


Рис. 5. Схема расположения пунктов сейсмической регистрации (а) при изучении сейсмического эффекта массовых взрывов на карьерах Курской магнитной аномалии; б – карьеры Лебединского (ЛГОК) и Михайловского (МГОК) горно-обогатительных комбинатов.

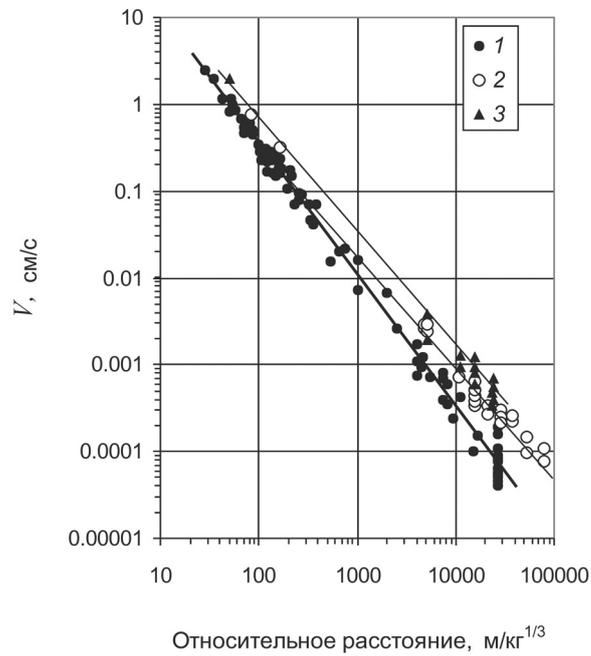


Рис. 6. Зависимость максимального модуля вектора скорости колебаний в сейсмическом сигнале от относительного расстояния до источника. Азимутальные направления: I – I; I – II; I – III

Результаты обработки полученной сейсмической информации представлены на рис. 6. Аналитически данные описываются следующими зависимостями:

Азимут I (северное направление):

$$V = 4 \left\{ \frac{q^{1/3}}{r} \right\}^{1,53}, \text{ см/с.}$$

Азимут II (северо-восточное направление):

$$V = 0,72 \left\{ \frac{q^{1/3}}{r} \right\}^{1,24}, \text{ см/с.}$$

Азимут III (северо-западное направление):

$$V = 3,86 \left\{ \frac{q^{1/3}}{r} \right\}^{1,35}, \text{ см/с.}$$

Особенностью приведенных на рис. 6 данных является заметное отличие в затухании сейсмического сигнала с расстоянием вдоль разных азимутов. Эти различия связаны с характеристикой среды вдоль разных трасс распространения сейсмического сигнала. Так, наибольшие амплитуды и меньший коэффициент амплитудного затухания сигнала наблюдается вдоль трассы, соединяющей область весьма крепких слабонарушенных горных пород между Ловозерским и Михайловским ГОКа-ми, в зоне которых проявляются выходы богатых железом рудных тел.

Наибольшее затухание сигнала происходит вдоль трассы, проходящей на север. Эта трасса характеризуется достаточно мощным (с утолщением по мере продвижения на север) слоем осадочного чехла.

Таким образом, результаты сейсмической регистрации при взрывах в отдельных скважинах и группах скважин, а также при массовых взрывах на карьерах свидетельствуют о существенном различии параметров сейсмического сигнала, распространяющегося по разным азимутам. На значительных расстояниях от источника эти различия могут быть весьма значимыми. Так, например, по данным рис. 6 видно, что на расстояниях около 500 км амплитуда сейсмического сигнала, распространяющегося по разным азимутам, может отличаться в два и более раза.

В качестве одной из причин, определяющей различия в законах распространения сейсмического сигнала вдоль разных азимутов, следует рассматривать влияние строения среды и свойств горных пород вдоль трасс распространения сигнала. Более нарушенная среда (наличие большого количества зон ослабления прочности в виде, например, тектонических разломов) с меньшими значениями упругих модулей оказывает на степень затухания сигнала большее влияние по сравнению с монолитными прочными породами.

На значительных расстояниях от источника, где амплитуда сигнала определяется волнами, распространяющимися по более глубоким слоям, в качестве другой возможной характеристики трассы, которая потенциально может характеризовать степень их поглощения, допустимо рассматривать, например, глубину залегания поверхности Мохоровичича. Действительно, глубина залегания поверхности Мохоро характеризует относительный вклад более слабых и более нарушенных по сравнению с породами верхней мантии участков среды в диссипативные процессы, то есть чем тоньше земная кора, тем слабее затухает интегральный сейсмический сигнал на расстояниях, превышающих 200–300 км.

На рис. 7 представлена глубина поверхности Мохо вдоль протяженных трасс I и II (рис. 5). Привлекая данные рис. 6, можно видеть, что наибольшая степень затухания сейсмического сигнала отмечается вдоль трассы I, которая, практически не захватывая Воронежский кристаллический массив, проходит к Московской синеклизе по участкам земной коры, характеризующимся достаточно мощным осадочным чехлом.

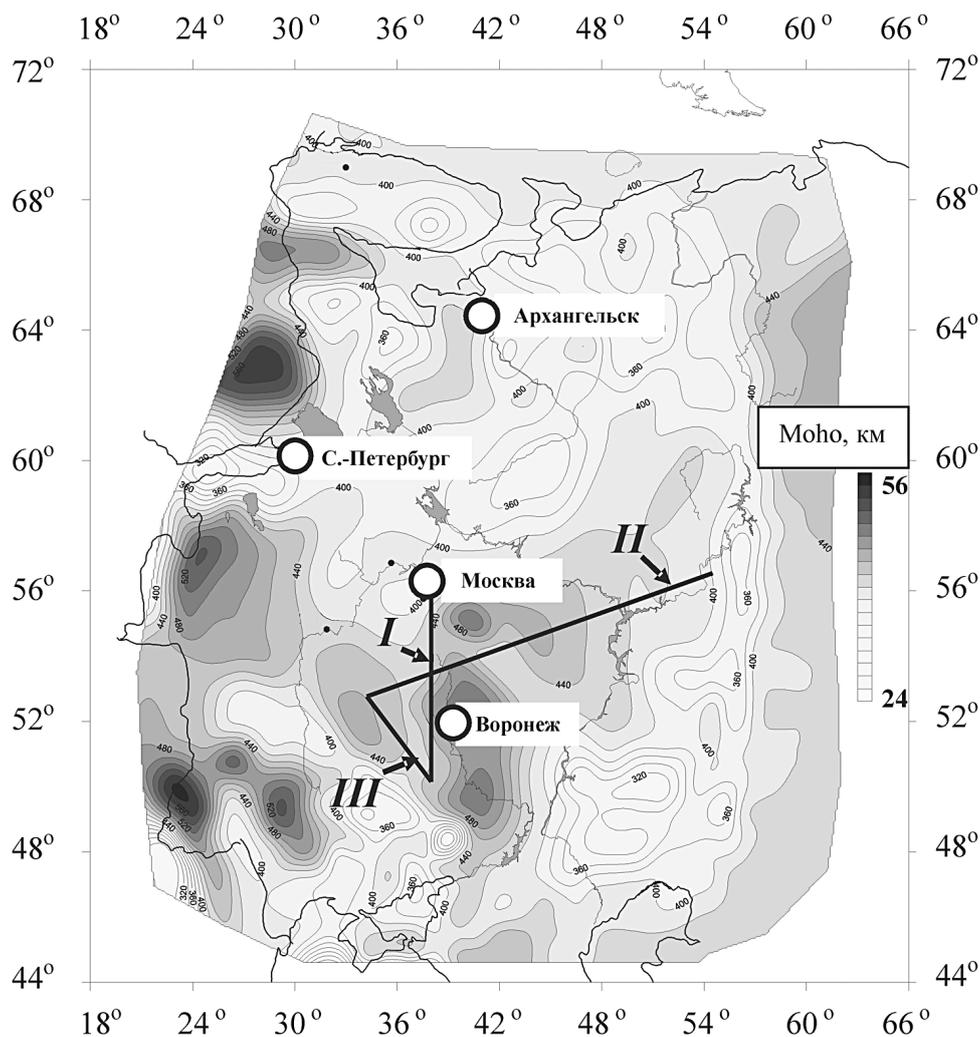


Рис. 7. Глубина поверхности Мохоровичича Восточно-Европейской платформы

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что если в непосредственной близости от карьера сейсмический сигнал представляет собой совокупность сейсмических сигналов от нескольких источников, количество которых определяется количеством отбиваемых блоков, то, начиная с расстояний около 20 км, сейсмическое

действие массового взрыва определяется единым источником. При этом закон изменения амплитуды волнового движения как на малых (до 20 км), так и на больших (до 2300 км) расстояниях определяется характеристиками трассы распространения сигнала.

Исследования выполнены при поддержке Совета по грантам при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-203.2012.5.

Литература

Адушкин В.В., Спивак А.А., Соловьев С.П., Перник Л.М., Кишкина С.Б. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах // Геоэкология. 2000. № 6. С. 554–563.

Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 579 с.

Кишкина С.Б., Спивак А.А. Локальный сейсмический эффект карьерных взрывов // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие. М.: ИДГ РАН, 1999. С. 111–116.

Спивак А.А., Спунгин В.Г., Перник Л.М. Особенности сейсмического эффекта массовых взрывов химического ВВ // Динамические процессы в геосферах под воздействием внешних и внутренних потоков энергии и вещества. М. ИДГ РАН, 1998. С. 270–278.