

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД ВЗРЫВОМ, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 534-6/-8

Е.В. Денисова, А.И. Конури, А.С. Кондратенко, В.В. Тимонин

О НОВЫХ ПОДХОДАХ К АКУСТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН ПНЕВМОУДАРНЫМИ МАШИНАМИ

В горнодобывающей промышленности параллельные скважины используются при ведении работ как открытым, так и подземным способом.

На открытых горных работах для укрепления откосов маловыветрелых твердых горных пород крупнооблочной, слоистой или сланцеватой структуры применяются различные механические способы крепления бортов с применением параллельных скважин (рис.1). Достоинствами такого крепления являются простота, низкая себестоимость, высокая надежность и эффективность в работе [1]. Необходимая длина скважин определяется мощностью ослабленной зоны, требующей укрепления, и ограничивается технологическими возможностями их установки. Минимальная длина несущих элементов, рекомендуемая к применению на карьерах, составляет 4-5 м.

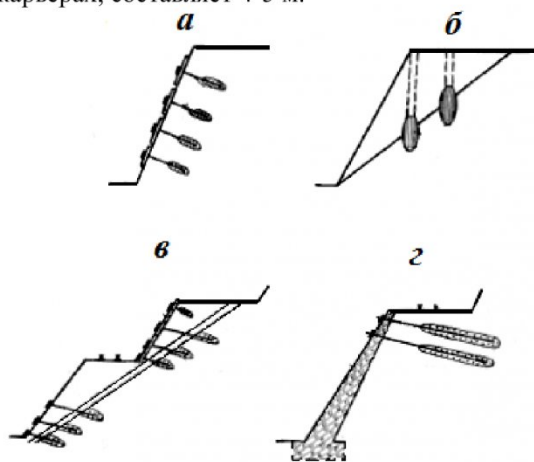


Рис. 1. Варианты усиления бортов карьеров с применением параллельных скважин:
а – железобетонные штанги; б – железобетонные шпильки; в – арматурная стяжка; г – гибкий элемент

Расчет устойчивости уступов включает не только определение величины давления, но и необходимой несущей способности конструкции. Важно обеспечить длительную устойчивость всего укрепленного массива. Следовательно, при расчетах необходимо рассматривать систему «горные породы – несущий элемент» и выбрать такие параметры укрепления, при которых сохранялось бы взаимодействие элементов этой системы без ее разрушения. Расчет несущей конструк-

ции производится на основе плана и разрезов ослабленного участка борта карьера, составленных по результатам маркшейдерской съемки и прочностных характеристик пород. Они определяются путем натуральных испытаний, лабораторных исследований или принимаются по аналогии на основании уже имеющихся данных о механических свойствах горных пород: угла внутреннего трения, угла трения по контакту слоев, удельного сцепления по контакту, плотности пород. Разрезы выполняются с интервалом 2-5 и даже 10 м, в зависимости от выдержанности параметров уступа и элементов залегания нарушения по протяжению участка. Расчет параметров укрепления производится отдельно для каждого участка.

К параметрам несущих элементов относятся: их геометрические параметры и нагрузочная способность, общее число элементов, расстояние между ними и их ориентация в пространстве (при расположении в один или несколько рядов); размеры укрепляемой зоны. Для выполнения расчетов все вышеуказанные параметры вводятся в расчетную модель. Среди известных компьютерных программ, используемых для расчета, большой популярностью у исследователей пользуются пакеты программ PLAXIS и ANSYS, основанные на методе конечных элементов. Может быть использован и метод дискретных элементов [2], предназначенный для решения задач механики сыпучих сред, грунтов, горных пород и механики деформируемого твердого тела. Во всех случаях для обеспечения расчетной несущей способности крепления откосов необходимо точное соответствие траекторий бурения скважин для установки несущих элементов с расчетной схемой.

Проходка параллельных скважин применима также при бурении взрывных скважин. Бурение взрывных скважин диаметром 105-249 мм осуществляется погружными пневмоударниками [3-5]. Идея заключается в увеличении массы и мощности зарядов за счет их деконцентрации в группах параллельно-сближенных скважин во взрывном разрушении горных пород (рис. 2.) [6]. Установлены следующие физические особенности действия взрыва параллельно-сближенных скважинных зарядов: на равных абсолютных расстояниях максимальные напряжения на фронте волны сжатия в среднем в 1,5 раза превышают максимальные напряжения при взрыве эквивалентного

цилиндрического заряда; удельный импульс волны напряжений в 2,3 раза больше импульса взрыва эквивалентного заряда. Взрывание параллельно-сближенных зарядов по дробящему действию эффективно не только в ближней зоне дробящего действия взрыва, но и в дальних зонах. Пучок параллельно-сближенных скважинных зарядов взрывчатого вещества можно представить как конструкцию, получаемую в результате разъединения на части заряда цилиндрической формы, что позволяет увеличить его поверхность, то есть площадь соприкосновения заряда с горными породами со снижением массы взрывчатого вещества, приходящуюся на единицу поверхности, и др. Разрушение доминирующего объема массива горных пород осуществляется не прямой волной напряжений, инициированной непосредственно при детонации каждого сближенного заряда взрывчатого вещества, а интегральной, образовавшейся в результате сложных взаимодействий нескольких прямых волн, что открывает широкие возможности повышения эффективности отбойки за счет применения параллельно-сближенных скважинных зарядов.

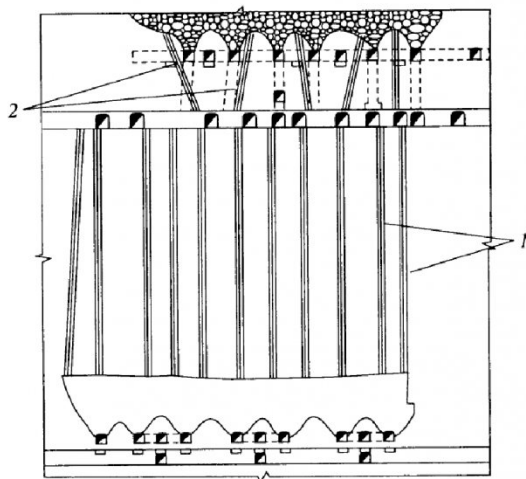


Рис. 2. Пример схемы расположения пучка параллельных сближенных зарядов в блоке: 1 – нисходящие скважины; 2 – восходящие скважины

Усиление действия взрыва сближенных зарядов в направлении, перпендикулярном к линии зарядов, в сравнении с эквивалентным зарядом круглого сечения, достигается совместным сложением волн напряжений, возбуждаемых каждым зарядом в группе, при этом интенсивность взрыва сближенных зарядов возрастает. Отклонение траектории параллельных скважин от проектной приводит к некачественному дроблению рудного тела или разубоживанию.

Таким образом, сооружение параллельных скважин является задачей актуальной и требует создания технических средств и технологий контроля их траекторий.

При параллельной проходке скважин на длину

до 50 м, на расстоянии более 5 м от дневной поверхности, ни один из современных способов навигации не в состоянии осуществлять контроль этого процесса с высокой точностью [7]. При этом известно, что уже на расстоянии 10-15 м от места запуска породоразрушающей машины отклонение формируемых ею скважин от первоначального направления может достигать 0,2 м, нарастая с увеличением их длины. В связи с этим, разработка акустических методов и технических средств, позволяющих обеспечить оперативный мониторинг траектории проходки скважин без или с минимальными вмешательствами в конструкцию породоразрушающего инструмента, является актуальной задачей. При последовательном бурении нескольких параллельных скважин значительно усложняется процесс контроля их траекторий из-за влияния имеющихся в массиве горных пород полостей на параметры акустического поля, создаваемого в процессе сооружения последующей скважины.

Применение бурения одновременно двумя пневмоударными машинами позволит формировать поле с явно выраженными экстремумами, по которым можно будет вести мониторинг траекторий формируемых скважин. В данном случае акустический контроль позволит исключить пересечение стволов скважин, повысить их качество, сократить экономические и временные затраты на бурение.

Поскольку на практике достичь синхронной работы двух машин невозможно, необходимо размещать в задней части каждой машины акустические излучатели, каждый из которых подключен к генератору импульсных акустических колебаний (рис. 3) заданной частоты. Таким образом, изменение расстояния между машинами (излучателями) и частоты генератора делает возможным формирование направленной диаграммы с выраженными максимумами и минимумами поля, по которым с помощью приемников, расположенных на поверхности земли в точках А и В, можно определять местоположение обеих машин, исключая пересечение скважин.

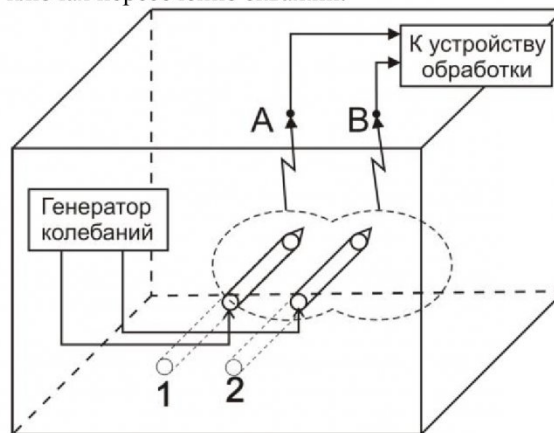


Рис. 3. Мониторинг траектории проходки параллельных скважин

Далее рассмотрены принципы формирования диаграмм направленности одно и двухточечных акустических излучателей, представлены результаты аналитических расчетов и численного моделирования их направленных свойств.

Направленные свойства точечной антенны, расположенной в однородном массиве горных пород, на расстоянии r можно выразить следующим образом [8]:

$$P = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (1)$$

где k – волновое число $2\pi/\lambda$ (λ – длина волны в геосреде), A – среднеквадратичная амплитуда давления на эталонном расстоянии, равном 1 м. Поскольку диаграмма направленности регистрирует относительные, а не абсолютные значения, то единственное, что нужно знать о величине A , – это остается ли она постоянной на протяжении всего периода испытаний. Поле точечной антенны представлено на рис. 4.

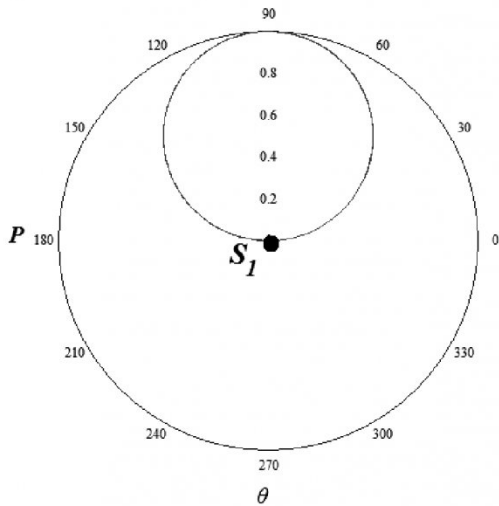


Рис. 4. Поле точечного излучателя

Для системы из двух точечных излучателей (рис. 5) в точке P на расстоянии r от центра координат O , выбранного посередине между ними, поле будет представлять собой сумму полей каждого излучателя, определяемых уравнением (1). Общее акустическое давление в P равно [8]:

$$p = \frac{A}{r_1} e^{j(\omega t - kr_1)} + \frac{A}{r_2} e^{j(\omega t - kr_2)}. \quad (2)$$

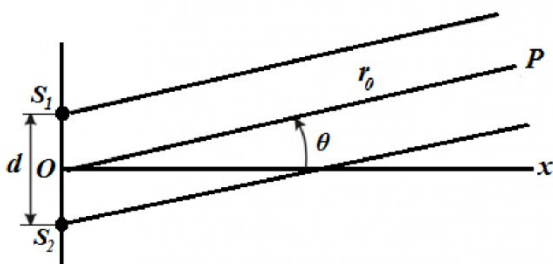


Рис. 5. Два синфазных точечных излучателя

Прямые, соединяющие S_1 и S_2 с точкой P , не будут параллельны. Это условие более выражено в зоне излучения Френеля, называемой ближним полем. Однако, если расстояние до P велико, и прямые PS_1 и PS_2 можно приближенно считать параллельными, то (2) можно упростить и придать ему следующий вид [8]:

$$p(\theta) = \frac{A}{r_0} e^{j(\omega t - kr_0)} \times (e^{j(kd/2)\sin\theta} + e^{-j(kd/2)\sin\theta}) \quad (3)$$

или

$$p = \frac{2A}{r_0} e^{j(\omega t - kr_0)} \cos\Psi,$$

где

$$\Psi = \frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta.$$

На диаграмму направленности системы из двух точечных излучателей будет оказывать влияние соотношение d/λ , то есть расстояние между ними, выраженное в величинах длины акустической волны (рис. 6).

При расположении точечных излучателей в одной горизонтальной плоскости на расстоянии, не превышающем $d = 0,5\lambda$, диаграмма направленности системы примет вид, как на рис. 6, а-б. При этом максимум диаграммы направленности находится строго посередине между двумя излучателями. Когда расстояние между машинами уменьшается (например, рис. 6, а, при $d = 0,3\lambda$) диаграмма становится более расплывчатой и соответственно разрешающая способность акустического метода по углу отклонения машин от заданных траекторий движения ухудшается.

В случае, когда расстояние между машинами $d = (0,5 \div 1)\lambda$, происходит появление дополнительных лепестков диаграммы направленности (см. рис. 6, в-г), уровень которых увеличивается с увеличением расстояния d . Максимальное значение диаграммы направленности также остается строго посередине между машинами.

Полученные выводы справедливы только для однородной среды, в слоисто-неоднородных средах картина распределения акустического поля излучателя или группы излучателей может резко измениться [9]. Диаграмму направленности системы излучателей в условиях, приближенных к реальным, целесообразно изучать с помощью методов численного моделирования, что позволит учитывать влияние параметров геосреды на ее направленные свойства.

Исследование влияния физико-механических параметров (плотности и модуля упругости) породного массива на направленные свойства простейшего акустического излучателя представлено в [10-12]. В грунтовый массив заглублен излуча-

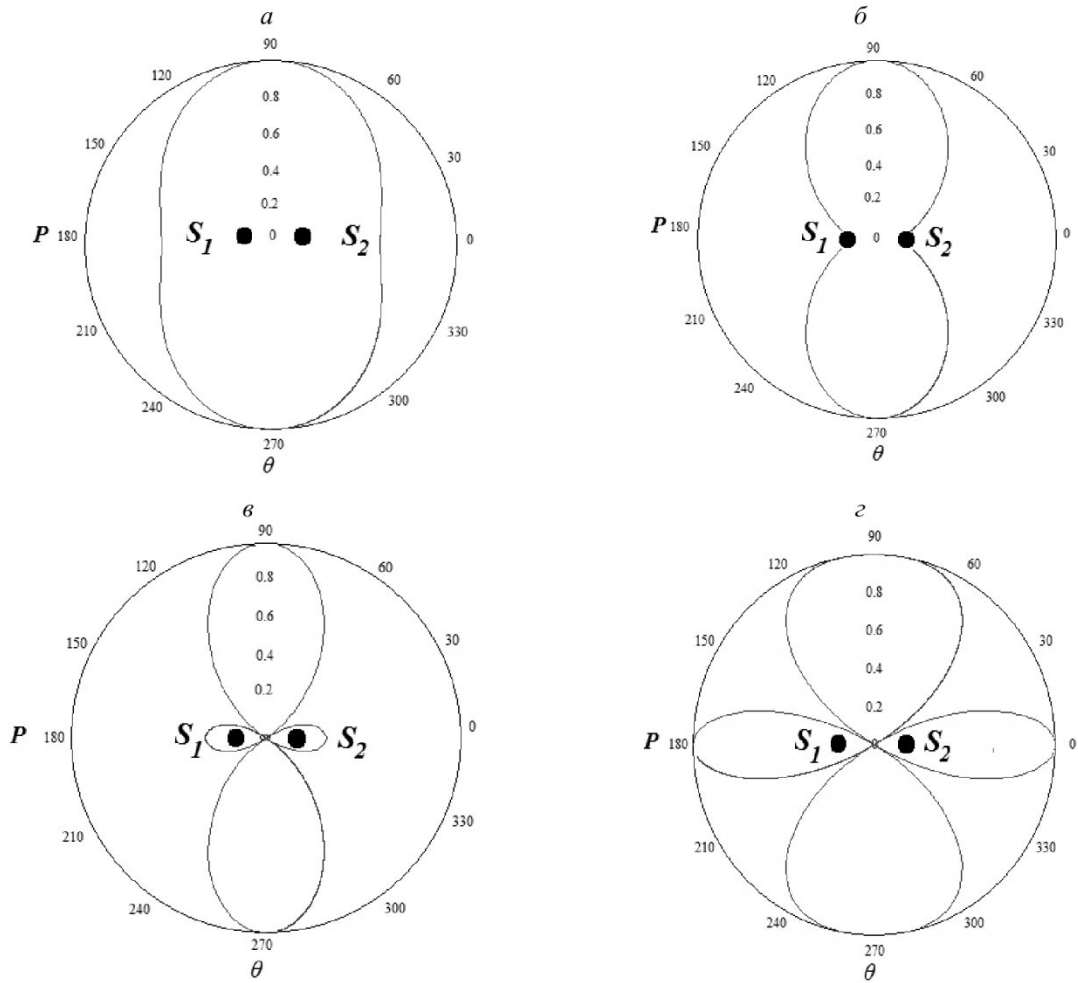


Рис.6. Диаграммы направленности группы из двух излучателей расположенных в одной горизонтальной плоскости на заданном расстоянии d :

a – для $d/\lambda=0,3$; $б$ – для $d/\lambda=0,45$; $в$ – для $d/\lambda=0,6$; $г$ – для $d/\lambda=1$

тель, возбуждаемый единичным силовым воздействием. Задача о распространении упругих колебаний в массиве вокруг излучателя решается методом конечных элементов на основе динамической теории упругости.

Для моделирования диаграммы направленности плоской акустической антенны подобная задача рассмотрена в трехмерной постановке для системы точечных излучателей, возбуждаемых единичным силовым воздействием одинаковой фазы

и амплитуды. При решении задачи из полубесконечного пространства была выделена область конечных размеров. Границы рассчитываемой области для геомеханической модели приняты исходя из принципа Сен-Венана (отсутствие влияние участка исследования на внешний контур расчетной области). Краевые условия задачи заданы в виде ограничений перемещений по вертикальной и горизонтальной границам расчетной области.

На рис. 7 представлены результаты численно-

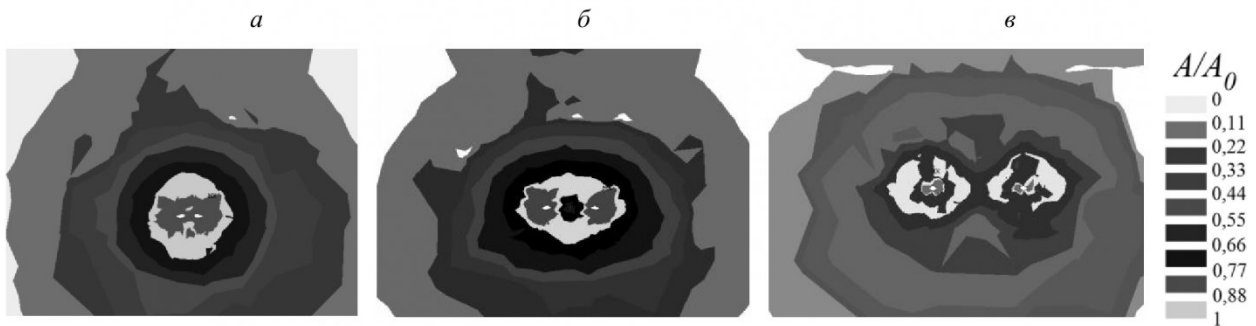


Рис. 7. Результаты численного моделирования диаграммы направленности системы из двух синфазных цилиндрических антенн: a – для $d/\lambda=0,15$; $б$ – для $d/\lambda=0,3$; $в$ – для $d/\lambda=0,6$

го моделирования диаграммы направленности двух цилиндрических излучателей, расположенных на разных расстояниях друг от друга.

Численное моделирование показало, что диаграмма направленности системы из двух цилиндрических антенн (в качестве которых используются возбуждаемые внешним акустическим полем пневмоударные машины), определяется расстоянием между ними, выраженным в длинах волн.

При $d/\lambda < 0,5$ контролировать положение машин целесообразно по максимуму, создаваемого акустического поля, который расположен строго посередине между двумя машинами. При $d/\lambda = 0,6$ между двумя излучателями появляются дополнительные лепестки диаграммы направленности рас-

сматриваемой системы, а выраженные максимумы сосредоточены над каждым излучателем (рис. 7, в). В данном случае определение местоположения машин возможно методом сравнения или перемножения двух максимальных сигналов.

Таким образом, с помощью математических расчетов и численного моделирования установлено, что использование двух пневмоударных машин с размещенными в их рабочих органах искусственными излучателями позволит сформировать направленную диаграмму акустического поля, по выраженным экстремумам которого можно осуществлять контроль траектории формируемых протяженных скважин различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фисенко Г.Л., Ревазов М.А., Галустьян Э.Л. Укрепление откосов в карьерах. – М.: Недра, 1974. – 106 с.
2. Ланис А.Л., Хан Г.Н. Модификация модели геосреды для решения задач механики грунтов методом дискретных элементов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – №1. – С. 273 – 281.
3. Тимонин В.В. Погружные пневмоударники для подземных горных работ. Теория машин и рабочих процессов // Сборник трудов. Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика О.Д. Алимова. – Бишкек. – 2012. – С. 202 – 206.
4. Кондратенко А.С., Тимонин В.В. О коэффициенте полезного действия погружных пневмоударников // *Научный журнал «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук»*. – Новосибирск, 2014. – С. 182 – 185.
5. Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.Е., Попелюх А.П., Карпов В.Н., Тимонин В.В. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014 – № 5 – С. 157 – 167.
6. Еременко, А.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири. – Новосибирск.: Наука, 2013. – 192 с.
7. Рыбаков, А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). – М.: ПрессБюро №1, 2005. – 304 с.
8. Крендалл, И. Б. Акустика: Пер. с англ. / И. Б. Крендалл. – 4-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 168 с.
9. Бауков Ю.Н. Горная геофизика. Геоконтроль неидеальных и неоднородных средств акустическими методами. Ч. 2. Упругие волны в слоисто неоднородном массиве. Учебное пособие. – М.: МГУ, 2000.
10. Денисова Е.В., Конурун А.И. Геомеханическая модель взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. [2013. – №5. – С. 61 – 70.
11. Денисова Е.В., Конурун А.И. Исследование влияния свойств грунтового массива на параметры распространяющегося в нем импульсного сигнала // *Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ)*. – М.: МГУ, 2014. – №8. – С. 176 – 181.
12. Денисова Е.В., Гаврилов С.Ю., Конурун А.И. Экспериментальные исследования и численное моделирование акустического поля, создаваемого на поверхности грунтового массива при движении в нем пневмоударной машины // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2013. – №5. – С. 106 – 109.

Авторы статьи:

Денисова Екатерина Вячеславовна,

к.т.н., старший научный сотрудник, ИГД СО РАН, e-mail: slimthing@mail.ru

Конурун Антон Игоревич,

младший научный сотрудник, ИГД СО РАН, e-mail: akonurin@yandex.ru

Кондратенко Андрей Сергеевич,

научный сотрудник ИГД СО РАН, e-mail: kondratenko@misd.nsc.ru

Тимонин Владимир Владимирович,

зав. лабораторией бурения, ИГД СО РАН, e-mail: timonin@misd.nsc.ru

Поступило в редакцию 14.02.2015