Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Доктор техн. наук *А. Л. Драбкин*,
канд. техн. наук *В. В. Масленникова*
(Ленинградский горный ин-т)

Наше время характеризуется бурным развитием радиоэлектроники и широким проникновением ее в различные отрасли народного хозяйства. Радиометоды успешно используются при поисках полезных ископаемых, в геофизических исследованиях, в маркшейдерском деле (радиодальномеры и лазерные указатели направления), начинается внедрение радиоэлектроники и на горных предприятиях. На открытых разработках используются радиосистемы диспетчерской связи; усиленно решается проблема аварийной радиосвязи в шахтах и рудниках. На обогатительных предприятиях с помощью радиометодов производится ускоренный анализ минерального сырья и продуктов обогащения, увеличивается автоматизация технологических процессов.

Еще большие перспективы имеют радиометоды непосредственно при разработке месторождений полезных ископаемых, и в первую очередь методы радиоинтроскопии горных пород и массивов. Эти методы основаны на свойстве радиоволн проникать в горные породы, распространяться в них по определенным законам, отражаться от границ разных пород и областей с неоднородными включениями. Глубокое понимание и использование физических законов взаимодействия электромагнитных волн с горными породами позволяет получить информацию о состоянии горного массива, его геологическом строении, оптимальных режимах проведения горных работ не только с точки зрения увеличения их производительности, но и с целью охраны земных недр.

Можно перечислить ряд конкретных задач, которые решаются методами радиоинтроскопии: определение границ полезное ископаемое — вмещающая порода; обнаружение в горном массиве карстовых полостей; определение границ водоносных слоев; измерение и контроль толщины целиков и потолочин; оперативное обнаружение валунов при вскрышных работах для предотвращения поломки соответствующих машин и механизмов; обнаружение и контроль за динамикой развития зон трещиноватости при возникновении движения горных масс; разрушение мерзлых горных пород высокочастотными электромагнитными полями и т. д.

Следует отметить, что методы радиоинтроскопии часто невозможно успешно использовать без одновременного создания устойчивых, помехозащищенных линий связи и передачи информации из труднодоступных или удаленных мест горного предприятия в пункты сбора и обработки информации.

Успешному решению всех этих задач и созданию стандартной аппаратуры часто препятствует также тот факт, что, в отличие от наземных радиосистем, подземные радиосистемы работают в крайне непостоянных условиях. Электромагнитные параметры горных пород меняются в широких пределах, и если радиосистема успешно работает на одном горном предприятии, то ее применение на другом, родственном, горном предприятии будет требовать перестройки, новой регулировки и градуировки, а часто и существенной переработки. Видимо, именно поэтому и не существует в настоящее время серийной радиоаппаратуры для целей горного производства и успешное внедрение современных достижений радиоэлектроники в горное дело возможно при наличии на горных предприятиях специалистов, хорошо знакомых с горным делом, радиоэлектронной техникой, глубоко понимающих физику взаимодействия электромагнитного излучения с горными породами. Таких специалистов готовит кафедра радиоэлектроники по специализации «Радиоинтроскопия горных пород» специальности 0210.

Как уже указывалось, электромагнитные волны, проникая в глубь горного массива и взаимодействуя с горными породами, позволяют получить информацию о состоянии и строении этого массива. Глубина проникновения электромагнитных волн длинно- и средневолнового диапазона в массив определяется в основном величиной проводимости σ горных пород, слагающих массив. В таблице приведена зависимость расстояния S в метрах для разных горных пород, на котором амплитуда электромагнитного поля уменьшается в 20 раз, от длины волны λ_0 радиоизлучения.

Зависимость расстояния S от длины волны λ_0 для разных горных пород

λ_0, м	Расстояние S, м			
	Известняки, плотные песчаники, доломит, ангидрит $\left(\sigma = 10^{-4}\frac{См}{м}\right)$	Песок нефтеносный, калийная соль $\left(\sigma = 10^{-3}\frac{См}{м}\right)$	Песок водоносный $\left(\sigma = 10^{-2}\frac{См}{м}\right)$	Глина $\left(\sigma = 10^{-1}\frac{См}{м}\right)$
500	67	21	6,7	2,1
1000	97	29	9,6	2,9
2000	135	41	13,5	4,1
4000	193	59	19,2	5,9
8000	271	83	27,5	8,3
16000	386	119	39,0	12,0

Из таблицы видно, что расстояние, на котором энергия электромагнитной волны затухает в 20 раз, для слабопроводящих пород составляет десятки и сотни метров, а для сильнопроводящих — единицы метров. Радиоволны этого диапазона могут использоваться для изучения состояния горного массива на больших расстояниях, а также для изучения состояния целиков, потолочин и т. д. Более короткие радиоволны — метрового и сантиметрового диапазона — могут использоваться для изучения скрытых выходов пластов горных пород, зон трещиноватости, зон повышенного давления и других с поверхности горной выработки или для скважинного изучения состояния горного массива. Эти волны несут информацию с глубин массива от нескольких метров до сантиметров.

Интенсивность взаимодействия электромагнитного излучения с горным массивом определяется электромагнитными параметрами горных пород, слагающих этот массив. Это прежде всего диэлектриче-

ская ε и магнитная μ проницаемости, характеризующие изменение внешнего поля за счет электрических зарядов и магнитных моментов, индуцированных этим полем в горной породе. Проводимость σ характеризует потери электромагнитной энергии в породе за счет возбуждения токов проводимости с последующим переходом в тепло. При распространении электромагнитных волн в однородном массиве (ε, μ и σ постоянны) происходит затухание волны, и по степени затухания можно судить о проводимости горной породы и ее плотности. При наличии областей со скачкообразным изменением параметров происходит отражение волн, степень отражения определяется величиной скачка параметров горных пород в контакте и позволяет судить не только о наличии границ, но и определить контактирующие породы.

Электромагнитные параметры горной породы в сильной степени зависят от ее влажности, степени трещиноватости и от давления, под которым находится данная порода. Наибольшие изменения сопротивления (рис. 1, *а*) и диэлектрической проницаемости (рис. 1, *б*) имеют место при начальном росте давления. Верхняя кривая на рис. 2 соответствует случаю, когда вектор электрического поля ориентирован параллельно направлению расслоения породы, а нижняя кривая — перпендикулярно ему. Таким образом, можно определить не только наличие зон трещиноватости по скачку диэлектрической проницаемости, но и направление расслоения. С ростом влажности удельное сопротивление горной породы (рис. 3) падает, поэтому наличие в массиве обводненных зон приведет к резкому увеличению потерь электромагнитной волны и возникновению отраженных волн. Диэлектрическая проницаемость горной породы растет с ростом ее влажности (рис. 4). Это связано с тем, что ε воды примерно равна 81, а ε горных пород 5—15.

Из сказанного выше следует, что имеется тесная связь между состоянием горного массива и величиной его электромагнитных параметров, а законы распространения электромагнитных волн определяются в сильной степени геологическим строением массива. Существует еще ряд более тонких эффектов, сопровождающих распространение радиоволн в массиве: изменение поляризации волны, явление двойного лучепреломления в анизотропных горных породах и т. д. Знание и глубокое понимание физики этих явлений позволит получить обширную информацию о явлениях в горном массиве при его эксплуатации.

В последнее время состояние горной техники позволило развернуть работы по сверхглубинному исследованию земной коры. Особенно

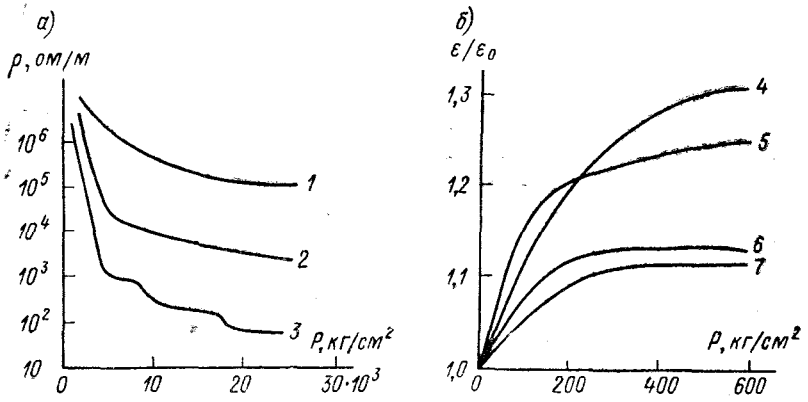


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления *а* и диэлектрической проницаемости *б* горных пород от давления:

1 — оливинита; *2* — эклогита; *3* — серпентинита; *4* — известняка; *5* — гранита; *6* — базальта; *7* — диабаза

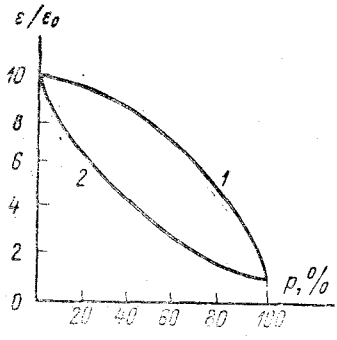


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости горной породы от трещиноватости

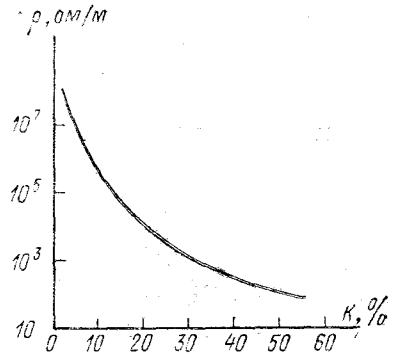


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления горной породы от влажности

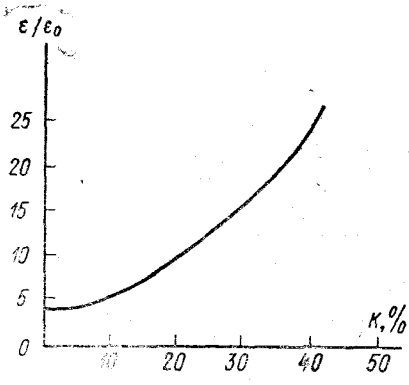


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости горной породы от влажности

эти работы будут развиваться в свете проблемы использования глубинного тепла Земли. Производство этих работ немыслимо без контроля состояния горного массива и буровых механизмов с последующей передачей информации на поверхность Земли. Поэтому представляет интерес оценить возможность применения для этой цели электромагнитных волн. Состояние земной коры на глубинах 10—20 *км* характеризуется не только большими всесторонними давлениями, действующими на горную породу, но и высокими температурами порядка 400—500° С. На электромагнитные параметры именно высокие температуры оказывают основное влияние. С ростом температуры резко уменьшается сопротивление горных пород — растет проводимость, так при температурах порядка 400°С сопротивление падает на 3—4 порядка, а при температурах около 1200°С сопротивление горных пород становится почти постоянным и равным примерно единицам ом на один метр.

То же самое можно сказать и о влиянии температуры на диэлектрическую проницаемость горных пород. Ферромагнитные горные породы при температурах примерно 600—1000° С переходят в парамагнитное состояние с $\mu \approx 1$. Поэтому на глубинах более 10 *км* следует ожидать, что горные породы представляют собой среды с сильно выраженными диэлектрическими свойствами, особенно на высоких частотах. Изучение законов распространения электромагнитных волн в таких средах интересно как в экспериментальном, так и в теоретическом плане, причем последнее уже невозможно без привлечения термодинамики и статистической физики. Но уже сейчас, исходя из грубых физических оценок, можно утверждать, что на больших глубинах для изучения состояния горного массива, для определения размеров и границ камер и резервуаров, созданных взрывом, следует применять высокочастотные электромагнитные колебания, а для передачи информации по обсадным трубам в скважине — длинные и средние волны, так как в этом случае можно создать режим волноводного распространения электромагнитной энергии.

Следует отметить, что изучение законов распространения электромагнитных волн в горных породах невозможно без одновременного привлечения теории электромагнитного поля и физики твердого тела, и, как часто это бывает, здесь можно ожидать появления новых интересных явлений на стыке двух направлений физики.

На кафедре радиоэлектроники и электронной техники ЛГИ ведутся научно-исследовательские работы по применению методов радиоинтроскопии в горном деле и внедрению достижений радиоэлектроники по следующим направлениям.

1. Теоретические исследования вопросов излучения и распространения электромагнитных волн в горных массивах и выработках. Применение любого метода радиоинтроскопии и проектирование линий передач информации и связи начинается с расчета и выбора оптимальной конструкции излучателя электромагнитных волн, а также его согласования с горным массивом. Эти вопросы слабо освещены в литературе, и в настоящее время решение указанных задач является основным направлением в области теории методов радиоинтроскопии горных массивов. Решению этих задач посвящены работы сотрудников кафедры [3, 4], где рассмотрены простейшие излучатели электромагнитных волн в виде короткого линейного провода и рамки с равномерным распределением тока, расположенных в полупроводящей горной породе. Для указанных излучателей получены законы распределения электромагнитного поля в ближней зоне и законы спадания амплитуды электромагнитного поля при удалении от них. Полученные выражения позволяют произвести расчет излучателя и выбрать оптимальные рабочие частоты в зависимости от назначения радиосистемы. Так, для пылеватого мерзлого суглинка ($\varepsilon=16$, $\mu=1$, $\delta=1{,}7\cdot10^{-3}\frac{сим}{м}$, влажность 10%, температура минус 10° С) получено, что при частоте 100 *Мгц* практически вся энергия электромагнитного поля расходуется на тепло в сфере радиуса 50—70 *см*, что является оптимальным при использовании излучателя в качестве рабочего органа устройства разрушения мерзлых горных пород.

Сравнение линейного и рамочного излучателей показало, что при равных условиях поле рамочного излучателя убывает медленнее, чем поле линейного. Рамочный излучатель целесообразно использовать для создания полей в горном массиве на больших расстояниях.

В работах [6, 7] рассмотрены вопросы распространения электромагнитных волн вдоль металлических направляющих в горных выработках. В качестве направляющих могут быть использованы троллеи, трубы со сжатым воздухом и другие промышленные коммуникации; передача информации и аварийная связь из труднодоступных мест может осуществляться, кроме того, по неизолированным тросам, расположенным на стенке выработки. В таких системах электромагнитные волны распространяются как бы в коаксиальном волноводе, наружный проводник которого — стенка горной выработки. В указанных работах произведен расчет параметров такой линии, разработана методика построения эквивалентных схем и получена оценка возможной дальности связи для разных горных пород. Оказалось, что для каждой горной породы имеется пороговая рабочая частота, за которой начинается резкий рост потерь в системе. Для большинства горных пород эти частоты лежат в пределах 1—5 *Мгц*. На основе проведенных расчетов была создана приемо-передающая система, которая была испытана в рудниках комбината «Ачполиметалл» и треста «Эстонсланец», обеспечивающая устойчивую связь в горной выработке до двух километров.

2. Разработка датчиков и системы передачи информации о горном давлении. Исследования в этом направлении велись для Северо-уральского бокситового рудника [5]. Описываемая система состоит из двадцати индуктивных датчиков, вырабатывающих радиосигнал изменения горного давления, и двадцатиканальной системы передачи, обеспечивающей связь с пунктом обработки информации, расположенным на расстоянии 500 *м* от исследуемой области горного массива. Радиодатчики являются наиболее чувствительными и надежными элементами для применения в горных условиях.

3. Разработка радиосистем контроля за движением горных масс. Это направление является новым и весьма перспективным, соответствующие работы ведутся для Солигорского месторождения калийных солей. Создается автономная радиосистема для определения трещиноватости в горном массиве скважинным способом. Система работает в сверхвысокочастотном диапазоне волн с разрешающей способностью 2—5 *см* по толщине зоны скалывания пласта.

Для этого же горного предприятия разрабатывается десятиканальная система передачи информации от механических датчиков движения горных масс. Система автономна, рассчитана на работу в скважине в течение 100 *ч*, передача осуществляется на частоте 10—15 *Мгц* на расстояние порядка 100—150 *м* беспроводным способом.

4. Создание системы безопасности движения (СБД) автосамосвалов [2].

Производительность работы автосамосвалов на открытых карьерах, перевозящих руду от места добычи к рудоспускам, резко снижается в условиях плохой видимости, увеличивается число аварий. Возникла необходимость в разработке системы, автоматически выдающей водителю автосамосвала сигнал при наличии впереди препятствия в виде встречной или попутной машины, борта карьера и т. д. Такая система разрабатывается для комбината «Апатит» (Кировск). Система представляет собой радиолокационную станцию с непрерывным излучением, модулированным по частоте. Рабочая частота системы 9000 *Мгц* (длина волны 3 *см*), что обеспечивает хорошую избирательность системы на расстояниях 5—100 *м*. В кабине водителя предполагается установить индикатор с дискретным отсчетом дальности светового типа. Система выполнена на полупроводниковых и микромодульных элементах и питается от бортовой сети автосамосвала типа БелАЗ. Макеты системы испытывались на карьере рудника Центральный комбината «Апатит». Испытания системы показали, что разработанный макет обеспечивает дальность захвата цели 5—80 *м*, угловое разрешение 5—8°, система производит захват цели в сложных метеорологических условиях (метель, туман, моросящий дождь). Разрабатываемая система весьма перспективна, так как может быть положена в основу комплекса аппаратуры для автоматического вождения самосвалов по заданным трассам.

5. Создание системы оперативного отображения информации [1]. Работы в этом направлении были начаты в 1969—1971 гг. совместно с ВИРГ. В результате проведения этих работ был спроектирован и испытан макет лазерного индикатора для системы оперативной связи с ЭЦВМ при решении горногеологических и геофизических задач. Такой индикатор выгодно отличается от известных быстродействующих индикаторов на основе электроннолучевой трубки более высоким разрешением и точностью, отсутствием дрейфа луча и главное — возможностью отображения оперативной информации на первичном информативном документе — структуре горного предприятия, карте геологического разреза, карте динамики движения горных масс и т. д. В настоя-

щее время проводится внедрение и дальнейшее развитие разработанной системы в ВИРГ и ВНИГРИ.

Как было показано выше, имеются большие возможности по созданию малогабаритной аппаратуры радиодиапазона для использования в горном деле. Разработанные нашей промышленностью современные электронные элементы — микромодули, интегральные и твердотельные схемы, точечные излучатели сверхвысокочастотной энергии (туннельные, лавинно-пролетные и ганновские приборы СВЧ) позволяют создавать миниатюрные автономные индикаторы состояния горного массива, разрабатывать эффективные элементы связи и передачи информации и т. д. Но для успешного внедрения этой аппаратуры и радиометодов в горное производство и особенно для ее эксплуатации необходимо наличие на горных предприятиях специалистов принципиально нового типа — горных инженеров-радиофизиков. Появление таких специалистов на горных предприятиях и рациональное их использование позволит значительно повысить техническую культуру горного производства, обеспечить большую безопасность работ, повысить производительность труда и обеспечить работу служб охраны недр. Такие специалисты пока в небольшом количестве готовятся на кафедре радиоэлектроники по специализации «Радиоинтроскопия горных пород». Студенты этой специальности широко привлекаются кафедрой к научно-исследовательским и теоретическим исследованиям и разработкам, проходя практику на горных предприятиях, изучают на месте возможности внедрения радиометодов для решения задач горного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вуль В. А., Омелин В. М. Основные характеристики лазерного индикаторного устройства. В сб. «Системы автоматизации научных экспериментов». СО АН СССР, 1971.

2. Гардзиш В. А., Масленникова В. В. Обеспечение безопасности движения большегрузных автосамосвалов при плохой видимости. Зап. ЛГИ, т. 62, вып. 1, 1972.

3. Драбкин А. Л. Элементарные излучатели в полупроводящей среде. Радиотехника и электроника, 1972, № 2.

4. Драбкин А. Л., Стеценко В. А. Распределение энергии электромагнитного поля вокруг излучателя, помещенного в горную породу с целью ее разупрочнения. В сб. «Термомеханические методы разрушения горных пород». Наукова думка, 1972.

5. Масленникова В. В., Семевская Н. В. Расчет параметров длинной линии при распространении электромагнитного сигнала вдоль провода в шахтной выработке. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1971, № 1.

6. Масленникова В. В., Семевская Н. В. Распространение электромагнитных сигналов вдоль промышленных проводников в шахтах. Зап. ЛГИ, т. 51, вып. 4, 1971.

7. Семевская Н. В. Прибор для беспроволочной передачи информации в шахте. В сб. «Горное давление и движение горных пород», вып. 69. Изд. ВНИМИ, 1968.