

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.654

### ВНЕДРЕНИЕ И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ WI-FI AD HOC В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

Х. Икеда<sup>1</sup>, Ю. Кавамура<sup>1</sup>, З. П. Л. Тунгол<sup>1</sup>, М. А. Мориди<sup>2</sup>, Х. Джанг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет Акита, E-mail: ha2ikedada@gmail.com, 010-8502, г. Акита, Япония

<sup>2</sup>Университет Кертин, WA, 6430, г. Калгурли, Австралия

Представлена беспроводная сенсорная система связи Wi-Fi ad hoc, в которой устройства регистрации данных и мобильные терминалы (например, смартфоны) обмениваются данными между собой. Передача осуществляется беспроводным способом от подземного стационарного блока к мобильному терминалу рабочего и затем, после выхода рабочего из шахты, к регистратору данных, расположенному на поверхности. Для проверки работоспособности рассматриваемой системы измерялись несколько показателей качества связи в различных условиях. Эксперименты показали, что устойчивое беспроводное соединение между стационарным блоком и мобильным терминалом при скорости передачи данных 2 Мбайт/с и коэффициентом пакетных ошибок ниже 25 % может быть установлено на расстоянии до 110 м на прямом отрезке и до 20 м на отрезке с поворотом выработки. С помощью предлагаемой системы возможно передавать до 79.2 Мбайт данных рабочему, который движется со скоростью 20 км/ч.

*Система связи, система Wi-Fi ad hoc, беспроводные сенсорные сети, шахта, система мониторинга*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190320

---

Подземные горные работы, ввиду особенностей рабочей обстановки, являются опасным видом деятельности. Значительный объем исследований посвящен уточнению факторов, приводящих к человеческим жертвам, повторению чрезвычайных ситуаций и к непредвиденным затратам при ведении горных работ [1–4]. К основным опасным факторам, характеризующим работу в шахте, относятся: слабое освещение, ограниченные пространства, вероятность обвала горных пород, слабая вентиляция, влажность, невозможность связи и сложность геологического строения [5]. Задачи обеспечения связи и функционирования мониторинговых систем особенно важны при подземных горных работах, где условия постоянно изменяются. Для их решения в качестве подземной системы связи можно использовать беспроводные сенсорные сети (WSN) для измерения параметров окружающей среды и отслеживания местоположения рабочих.

Цель настоящего исследования — определение работоспособности сетей Wi-Fi ad hoc в подземных условиях. Измерялись и анализировались такие показатели качества, как мощность сигнала, скорость и дальность передачи данных. На основе полученных результатов определялось, подходит ли рассматриваемая технология для применения в подземных условиях.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ШАХТ**

Системы беспроводных сенсорных сетей (WSN) являются одними из передовых технологий в области вычислительной техники. Они вносят вклад в решение задач в различных областях промышленности и обеспечивают потребителей связью на протяжении более чем 50 лет. Эта технология использовалась для мониторинга состояния грунтов [6], окружающей среды [7] и в ряде других областей [6].

Продемонстрирована возможность применения систем WSN с большим количеством измерительных узлов, обеспечивающих достаточную точность при низкой стоимости. Такие узлы могут измерять некоторые параметры окружающей среды и передавать результаты измерений соседним узлам по беспроводному каналу связи. В [6, 8] утверждается, что помимо способности беспроводных сенсорных сетей измерять параметры окружающей среды, они обладают низким энергопотреблением и высокой экономической эффективностью. Системы WSN просты в установке и способны надежно передавать данные. Беспроводная передача данных позволяет избегать трудностей при физической прокладке линий связи в сложных подземных условиях и делает систему WSN крайне полезной при ведении горных работ [9]. За последние двадцать лет беспроводные сенсорные сети внесли существенный вклад в развитие технических средств для обнаружения газов и прогнозирования динамических форм проявления горного давления в шахтах [10].

Беспроводные сенсорные сети могут быть использованы в качестве автономных сетей путем автоматической и не требующей глубоких технических знаний настройки узлов, связанных между собой беспроводным способом. Каждый узел является как маршрутизатором для соседних узлов, так и передатчиком собственных данных. Таким образом формируется сеть, которая обеспечивает более устойчивое соединение и мониторинг, чем проводные сети, имеющие в подземных условиях высокую вероятность отказа по причине обрыва соединения. Следует отметить, что системы беспроводных сенсорных сетей обладают гибкой конфигурацией и способны справляться с отказами путем определения альтернативного маршрута связи при возникновении сбоя передачи данных. Такие системы позволяют пользователям диагностировать, ремонтировать и ликвидировать свои сети без остановки горных работ.

Количество измерительных узлов в одиночной беспроводной сенсорной сети может варьировать от ста до тысячи. При таком количестве узлов система беспроводных сенсорных сетей способна обеспечить полное покрытие и работоспособность мониторинга в подземных условиях [11]. Она может в любое время обнаружить некоторое событие, произошедшее на заданном участке в шахте и отправить соответствующие данные через сеть измерительных узлов. Эта особенность — еще один фактор, позволяющий использовать систему беспроводных сенсорных сетей при организации горных работ.

На рис. 1 показаны области потенциального применения систем беспроводных сенсорных сетей в подземных условиях и выделены три основных направления: мониторинг, связь, определение местоположения. Мониторинг разделяется на мониторинги среды и технических параметров шахтного оборудования.

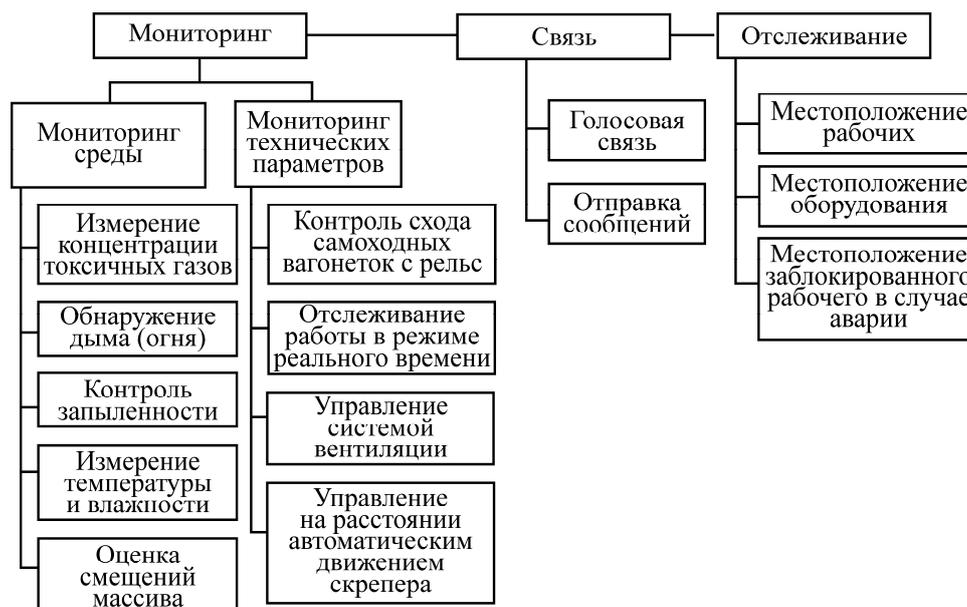


Рис. 1. Применение беспроводных сенсорных сетей (WSN систем) в шахтных условиях

ZigBee — протокол управления измерениями и связью в WSN системе, в его основе лежит стандарт IEEE 802.15.4. Некоторые характеристики, поддерживающие использование технологии ZigBee, отражены в указанных ранее работах. С учетом того, что терминалы могут соединяться в единую сеть, имеется возможность создать гибкую систему даже в сложных подземных условиях. С помощью явления многократного отражения радиоволн терминалы способны передавать данные между собой и на поверхность. В частности, Кавамура и Морида [12, 13] исследовали систему связи, работающую на основе протокола ZigBee, установленную в шахте, с целью разработки надежной и эффективной системы связи. К тому же сети с протоколом ZigBee могут использоваться для поддержки геоинформационных систем, для предотвращения подземных аварий и для создания комплексной системы связи между операторами на поверхности и рабочими внутри шахты, включая систему аварийной связи.

Организация качественной системы связи в шахтах позволяет повысить безопасность и эффективность горных работ, а также оптимизировать технологические процессы [14]. Авторами подробно рассмотрена текущая технология и направление развития сетей связи в подземных условиях, включая системы излучающих линий передач и свойства протокола ZigBee. В [15] подтверждено, что сети с протоколом ZigBee могут применяться для мониторинга температуры, обнаружения огня, измерения влажности и концентрации газа. В [16] показано, что с помощью модуля CC2430 ZigBee данный протокол можно использовать для отслеживания рабочих и оборудования внутри шахты. На основе этих работ сделан вывод о пригодности применения сетей с протоколом ZigBee для организации мониторинга в шахтах [17]. При этом отмечается, что протокол ZigBee не обладает высокой скоростью; передача таких данных, как изображение, занимает длительное время.

Сеть Wi-fi ad hoc является альтернативой WSN системе и обладает следующими дополнительными особенностями: установка прямого однорангового соединения между устройствами без использования точки доступа или маршрутизатора, перемещение устройств (смартфоны, которые носят с собой рабочие), способных подключиться к данной системе, может быть средством передачи информации. В исследовании рассмотрены эти особенности и указывается, что использование подобных систем для информатизации шахт является целесообразным.

В табл. 1 представлено сравнение между сетями на основе стандартного протокола Wi-Fi и другими беспроводными технологиями передачи данных. Сеть на основе стандартного протокола Wi-Fi имеет ограничение по количеству терминалов, которое она способна принять.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение различных стандартов беспроводной связи

Параметр	Беспроводная технология		
	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Дальность передачи, м	100	10	50 – 500
Скорость передачи, Мбайт/с	11	1	0.25
Количество узлов	32	7	65 536
Время автономной работы	Несколько часов	Несколько дней	Несколько месяцев или лет
Применение	Беспроводная локальная сеть	Беспроводные звуковые устройства	Инструментальный контроль

Для внедрения стандартной Wi-Fi системы требуются дополнительные устройства, такие как маршрутизаторы и вспомогательные кабели, что повышает капитальные и эксплуатационные затраты. При установке сети Wi-fi ad hoc, функционирующей на основе принципа “от устройства – к устройству”, затраты минимизируются.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В открытом пространстве затухание радиоволны пропорционально квадрату расстояния и квадрату длины волны. В открытом пространстве основные потери при распространении волны, характеризующие затухание излучения на определенном расстоянии от антенны, могут быть рассчитаны по следующим выражениям:

$$L = 10 \log(4\pi d / \lambda)^2, \tag{1}$$

$$\lambda = 3 \cdot 10^8 / f, \tag{2}$$

где  $\lambda$  — длина волны, м;  $d$  — расстояние, м;  $f$  — частота, МГц.

В реальных условиях отраженные от поверхности волны приводят к интерференции, возникают также другие факторы, связанные с потерями при распространении волн. Данные потери невозможно точно вычислить с помощью указанных выше формул. Тем не менее, используя тенденцию, полученную при измерениях, можно оценить их фактическое значение. В соответствии с (1), потери при распространении волн повышаются с увеличением расстояния. Учитывая, что окружающая среда влияет на волновые потери, эксперименты выполнялись в различных условиях. Значение коэффициента мощности принимаемого сигнала RSSI позволяет проверить надежность беспроводного соединения в реальных условиях, а оценка коэффициента пакетных ошибок PER представляет собой общий метод оценки качества приема данных и влияния интерференции [18]. Коэффициент пакетных ошибок характеризует отношение неприятых пакетов данных (NF) из-за ошибок к общему количеству переданных пакетов (NAT) и выражается в процентах:

$$PER = \frac{NF}{NAT} \cdot 100. \tag{3}$$

Данный коэффициент позволяет определить скорость соединения и время запаздывания системы, поскольку коэффициент мощности принимаемого сигнала RSSI является абсолютным значением напряженности электрического поля для передающего устройства [19]. Если требуемое значение RSSI известно заранее, то можно провести эксперименты по установлению конфигурации (найти расположение устройств и условия их размещения), которая приводит к регистрации RSSI больше известного значения. Таким образом, данный подход может измерять

мощность, даже если из-за интерференции волн ухудшилось качество приема данных. В результате для расчета мощности принимающей антенны с учетом формулы потерь при распространении в открытом пространстве используются следующие выражения:

$$PR / PT = G_t G_r (\lambda / 4\pi d)^2, \tag{4}$$

$$G = 4\pi(A_e) / \lambda^2, \tag{5}$$

где PR, PT — мощности приемника и передатчика соответственно, Вт;  $G_t$  и  $G_r$  — коэффициенты усиления передающей и принимающей антенны по отношению к изотропному излучателю, дБ;  $\lambda$  — длина волны, м;  $d$  — расстояние, м;  $A_e$  — эффективная апертура, связанная с физическим размером антенны, м<sup>2</sup>. Максимальное значение PT стационарного блока составляет ~1.5 Вт.

Согласно уравнениям (4), (5), в случае, когда коэффициент усиления передающей или принимающей антенны не зависит от частоты, более высокая частота будет приводить к ослаблению мощности принимаемого сигнала. При распространении волн в открытом пространстве и в стационарной системе связи, где расстояние не изменяется, проектирование такой системы относительно проще, поскольку нет причин для изменения мощности принимаемого сигнала. Однако расчеты в реальных условиях достаточно сложны для выполнения. Потери при распространении волн в открытом пространстве можно незначительно скорректировать путем установки передатчика и приемника на некоторую высоту. Следует отметить, что беспроводные устройства подвержены влиянию со стороны рельефа местности, зданий и погоды. Такие приборы особенно чувствительны, если высота их расположения от поверхности земли составляет ~1 м. Поэтому появляется существенное различие между расчетными и измеренными значениями. Для передаваемых данных в условиях загородной застройки с частотой 400 МГц и регистрацией затухания на расстоянии 200 м эффективная разница составляет 20 дБ по сравнению с потерями при распространении волн в открытом пространстве. Учитывая указанные аспекты в реальных условиях, дано заключение о необходимости подтверждения качества работы системы связи путем измерений и экспериментов.

Общий план проведения исследования представлен на рис. 2. На начальной стадии проводится настройка коммуникационного оборудования и смартфонов, совместимых с режимом Wi-fi ad hoc. Затем выполняются эксперименты по передаче и приему данных.



Рис. 2. Общий план текущего исследования

Концептуальная схема предлагаемой системы показана на рис. 3. На первом этапе устройства регистрации накапливают и хранят данные, поступающие от периферийных датчиков, путем подключения к смартфонам, находящимся в зоне покрытия через систему Wi-fi ad hoc (рис. 4).

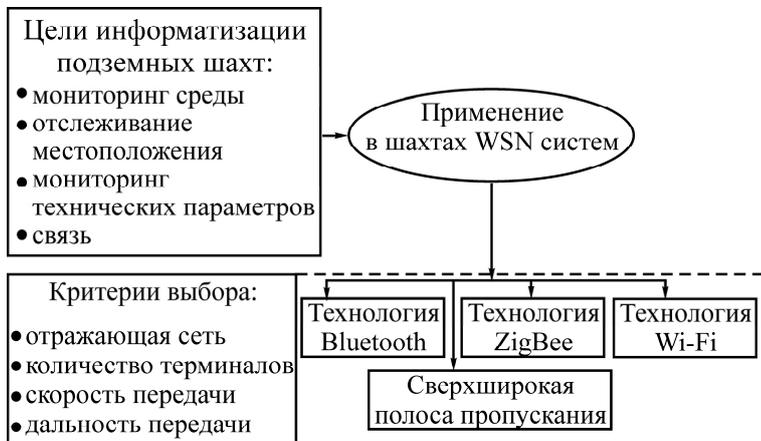


Рис. 3. Информатизация шахты с помощью WSN систем

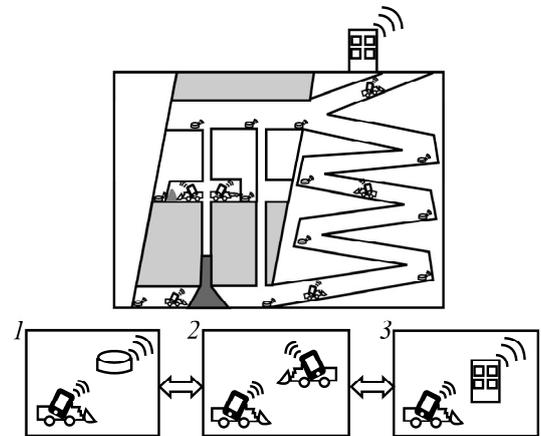


Рис. 4. Иллюстрация работы системы Wi-fi ad hoc

На втором этапе устройства регистрации данных автоматически подключаются к смартфонам перемещающихся рабочих в тот момент, когда оба устройства находятся в общей зоне покрытия. Этот шаг повторяется для каждого смартфона, находящегося в диапазоне доступа, полученные данные копируются. В течение этого процесса несколько смартфонов принимают системные данные. Когда рабочий покидает шахту, его смартфон подключается к регистратору, расположенному на поверхности, и передает ему данные, завершая процесс передачи информации из подземного участка на поверхность.

Для проверки качества работы предлагаемой системы связи измерены и проанализированы при различных условиях дальность и скорость передачи, коэффициент мощности принимаемого сигнала. Система мониторинга приведена на рис. 5.

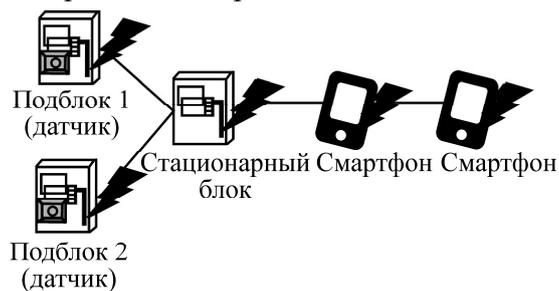


Рис. 5. Схема работы системы мониторинга

Эксперименты проводились на закрытой медной шахте “Osarizawa”, расположенной в префектуре Акита, Япония [20]. Размеры подземных выработок составляли около 2 м в высоту и 2 м в ширину с кровлей арочного типа без затяжки вмещающих пород (рис. 6а). Влажность внутри шахты достигала 90%. Внутри выработки рассматривались два случая: связь на прямом отрезке и на отрезке с углом поворота 105°. Данные для проведения эксперимента были заранее отправлены на стационарный блок. Затем использовалась система мониторинга для передачи и сбора данных от стационарного блока к смартфону.

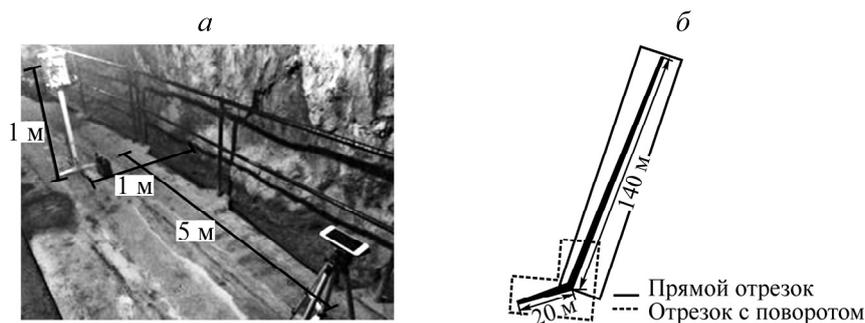


Рис. 6. Проведение эксперимента в реальных условиях (а) и схема экспериментальной площадки (б)

В течение эксперимента оборудование располагалось примерно вдоль центральной оси выработки. Для оценки эффективности работы системы Wi-fi ad hoc в шахтных условиях необходимо определить дальность и скорость передачи, время ожидания и устойчивость передачи данных. Эти величины оценивались путем измерения коэффициента мощности принимаемого сигнала RSSI и скорости связи (т. е. пропускной способности канала). Дальность и скорость передачи рассчитывались на основе экспериментов на прямом отрезке и на отрезке с поворотом (6б).

Стационарный блок и датчики использовали компьютер Raspberry Pi 3, который настроен для стандарта IEEE 802.11a/ac/b/g/n с модулем GW-300S KATANA. В частности, стандарт IEEE 802.11n использовался в экспериментах для увеличения выходного напряжения модуля до максимума. В качестве камеры задействован датчик Sony IMX219PQ, разрешение которого было снижено для получения и передачи файла-изображения с размером 1 Мбайт. Подвижным блоком служил iPhone 6s, совместимый со стандартом IEEE 802.11a/ac/b/g/n.

Данный смартфон перемещали от стационарного блока с интервалом 5 м (рис. 7) [13]. Далее для каждого расстояния между обоими устройствами устанавливали соединение и замеряли коэффициент мощности принимаемого сигнала RSSI и скорость передачи данных до тех пор, пока соединение было возможно. Для получения качественной оценки устойчивости соединения в каждой измерительной точке данные передавались 100 раз.

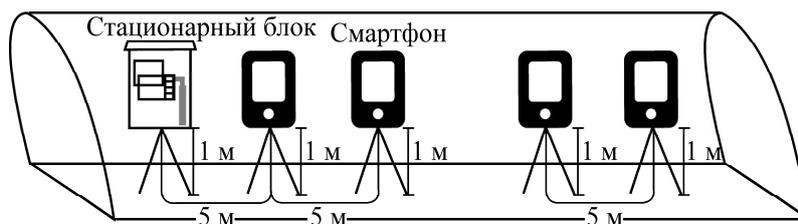


Рис. 7. Схема проведения эксперимента

Расчет скорости связи проводился путем деления размера файла-изображения (FS), полученного при передаче данных, на затраченное на передачу время (ST). Далее строились графики зависимости средних значений скорости передачи данных и RSSI от расстояния. На основе этих данных устанавливалось максимальное расстояние устойчивого соединения стационарного блока со смартфоном.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Значения коэффициента мощности принимаемого сигнала RSSI для прямого отрезка и отрезка с поворотом в условиях шахты “Osarizawa” представлены на рис. 8а. Значение RSSI –80 дБм определено как граничное минимальное значение для устойчивого соединения. На пря-

мом отрезке на расстоянии 100 м значение RSSI составляет  $-80.3$  дБм и после данной точки резко уменьшается. Так, на расстоянии 115 м оно равно  $-83.4$  дБм, затем колеблется около  $-80$  дБм. Следует отметить, что после применения логарифмической регрессии получено значение R-квадрата линии аппроксимации, которое составляет 0.61. Таким образом, линия аппроксимации показывает неудовлетворительное соответствие значениям данных. Указанное расхождение можно связать с особенностями шахты — неровностью бортов выработки, которая могла повлиять на отражение волн. Следовательно, возможно, что оценка по потерям распространения волн в открытом пространстве не подходит для данных условий. Тем не менее по линии аппроксимации сделан вывод, что дальность системы связи на прямом отрезке равна 110 м.

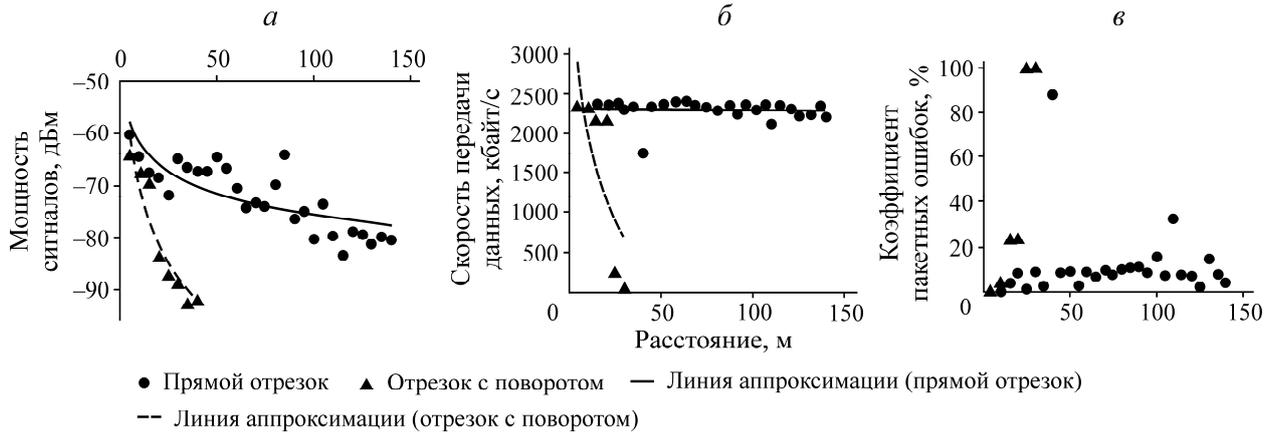


Рис. 8. Зависимости коэффициента мощности принимаемого сигнала RSSI (а), скорости передачи данных (б) и коэффициента пакетных ошибок (в) от расстояния

Как видно на рис. 8а, значение RSSI на расстоянии 20 м на отрезке с поворотом составляет  $-83.6$  дБм и уменьшается с увеличением расстояния. Подобно прямому отрезку, определена логарифмическая регрессия по средним значениям и построена линия аппроксимации со значением R-квадрата 0.9. Линия аппроксимации обеспечивает соответствие данных, полученных экспериментально. На основе данной линии сделан вывод, что дальность системы связи на участке с поворотом составляет 15 м.

На рис. 8б приведены значения пропускной способности, которые обобщены следующим образом. На прямом отрезке на расстоянии 40 м скорость передачи данных равна 1.8 Мбайт/с, тогда как скорости до 2.5 Мбайт/с наблюдались на меньших расстояниях. Соответствующая логарифмическая линия аппроксимации показывает низкое значение R-квадрата — 0.01. На отрезке с поворотом среднее значение пропускной способности составляло 2.3 Мбайт/с на расстоянии 25 м. Подобно результатам на прямом отрезке, более высокие скорости до 2.5 Мбайт/с отмечались на меньших расстояниях. В этом случае логарифмическая линия аппроксимации дает значение R-квадрата 0.56. Следующий шаг — оценка эффективности передачи данных при скорости свыше 2 или 16 Мбайт/с на основе полученных результатов.

На рис. 8в представлены зависимости коэффициента пакетных ошибок от расстояния. Видно, что соединение со скоростью 2 Мбайт/с и коэффициентом пакетных ошибок ниже 25% достигается на расстоянии менее 110 м на прямом отрезке и менее 20 м на отрезке с поворотом. На основе обобщенных результатов установлено, что для создания устойчивой сети Wi-fi ad hoc в подземных условиях достаточно разместить стационарный блок на каждом повороте или через каждые 110 м прямого отрезка. Передача данных возможна на ско-

ростях 2.0–2.5 Мбайт/с при значении RSSI не менее –80 дБм почти на любом участке. Данная скорость является достаточной для надежной беспроводной передачи файла-изображения размером 1 Мбайт в условиях шахт.

Поскольку работоспособность системы связи остается неизменной при использовании единого стандарта Wi-Fi в одинаковых условиях, результаты экспериментов применимы для обеспечения соединения между смартфонами и промежуточными блоками. Рассмотрена ситуация, при которой рабочий, перемещающийся на технике со скоростью 20 км/ч, имеет при себе смартфон. Когда он попадает в зону покрытия стационарного блока, промежуточного блока, подблока или смартфона другого рабочего, автоматически начинается передача данных. Независимо от того, движется рабочий или имеется соединение между смартфонами, стационарным или промежуточным блоками, время для передачи данных составляет 39.6 с. В рамках такого ограничения времени и скорости передачи данных в системе можно передать 79.2 Мбайт. В случае, когда двое рабочих перемещаются навстречу друг другу, и их относительная скорость составляет 40 км/ч, время передачи данных сокращается до 19.8 с, а максимальный объем данных ограничивается 39.6 Мбайт.

Таким образом, чем меньше относительная скорость между устройствами, тем больший объем данных можно передать. Время соединения рассчитывается путем деления скорости транспортного средства на дальность связи, а объем переданных данных — умножением времени соединения на пропускную способность. Согласно рассмотренной ситуации и соответствующим расчетам, можно ожидать объем передаваемых данных 39.6–79.2 Мбайт при максимально допустимой скорости, обеспечивающей надежную передачу информации в формате текста или изображения в подземных условиях.

#### ВЫВОДЫ

Использование подземных WSN систем значительно улучшает технические средства мониторинга окружающей среды, отслеживания местоположения рабочих, наблюдения за технологическими процессами и создает устойчивую подземную беспроводную систему связи. Технология Wi-fi ad hoc позволяет передавать от 39.6 до 79.2 Мбайт данных по мониторингу на дальность 110–120 м со скоростью 2 Мбайт/с и применима для информатизации шахт. Однако перекрестки и повороты в сети выработок значительно влияют на распространение радиоволн, снижая эффективность системы, что необходимо учитывать при проектировании реальных систем. Для обеспечения качества работы системы в таких условиях предложено размещать промежуточные блоки на отрезках изгиба выработок и на перекрестках.

Полученные результаты могут стать основой для будущих исследований, посвященных системам мониторинга окружающей среды, а также проверке системы в других типах шахт для дальнейшего изучения факторов, влияющих на качество их работы. Возрастающая потребность в полезных ископаемых приводит к созданию более глубоких и сложных шахт, и технологии окажутся необходимыми для снижения рисков, обеспечения безопасности и повышения производительности горных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khanzode V. V., Maiti J., and Ray P. K.** A Methodology for evaluation and monitoring of recurring hazards in underground coal mining, *Safety Science*, 2011, Vol. 49, No. 8–9. — P. 1172–1179.
2. **Saleh J. H. and Cummings A. M.** Safety in the mining industry and the unfinished legacy of mining accidents: safety levers and defense-in-depth for addressing mining hazards, *Safety Science*, 2011, Vol. 49, No. 6. — P. 764–777.

3. **Butler T. and Simser B.** Early access microseismic monitoring using sensors installed in long boreholes, *J. of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, Vol. 118, No. 3. — P. 251–257.
4. **Hudyma M., Potvin Y., and Allison D.** Seismic monitoring of the Northparkes Lift 2 block cave – Part 2 production caving, *J. of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2008, Vol. 108, No. 7. — P. 421–430.
5. **Gamache M., Grimard R., and Cohen P.** A Shortest-path algorithm for solving the fleet management problem in underground mines, *European J. of Operational Research*, 2005, Vol. 166, No. 2. — P. 497–506.
6. **Akyildiz I. F. and Stuntebeck E. P.** Wireless underground sensor networks, *Ad Hoc Networks*, 2006, Vol. 4, No. 6. — P. 669–686.
7. **Oliveira L. M. L. and Rodrigues J. J. P. C.** Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring, *J. of Communications*, 2011, Vol. 6, No. 2. — P. 143–151.
8. **Saraswala P. P.** A Survey on routing protocols in ZigBee network, *Int. J. of Engineering Science and Innovative Technology*, 2013, Vol. 2, No. 1. — P. 471–476.
9. **Kumari S. and Om H.** Authentication protocol for wireless sensor networks applications like safety monitoring in coal mines, *Computer Networks*, 2016, Vol. 104. — P. 137–154.
10. **Buratti C., Conti A., Dardari D., and Verdone R.** An overview on wireless sensor networks technology and evolution, *Sensors*, 2009, Vol. 9, No. 9. — P. 6869–6896.
11. **Al-Karaki J. N. and Kamal A. E.** Routing techniques in wireless sensor networks: A Survey, *IEEE Wireless Communications*, 2004, Vol. 11, No. 6. — P. 6–28.
12. **Kawamura Y. and Dewan A. M.** Using GIS to develop a mobile communications network for disaster-damaged areas, *Int. J. of Digital Earth*, 2014, Vol. 7, No. 4. — P. 279–293.
13. **Moridi M. A. et al.** An Investigation of underground monitoring and communication System based on radio waves attenuation using ZigBee, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, Vol. 43. — P. 362–369.
14. **Ashwini G. and Babu C. R.** A Survey of wireless communication modeling for underground mining, *Int. J. of Research in Advanced Engineering Technologies*, 2014, Vol. 3, No. 4. — P. 27–33.
15. **Chehri A., Fortier P., and Tardif P. M.** UWB-based sensor networks for localization in mining environments, *Ad Hoc Networks*, 2009, Vol. 7, No. 5. — P. 987–1000.
16. **Chen G.-Z. et al.** Sensor deployment strategy for chain-type wireless underground mine sensor network, *J. of China University of Mining and Technology*, 2008, Vol. 18, No.4. — P. 561–566.
17. **Zhou G., Zhu Z. and Li W.** Node deployment of band-type wireless sensor network for underground coalmine tunnel, *Computer Communications*, 2016, Vol. 81. — P. 43–51.
18. **Zhou C., Plass T., Jacksha R., and Waynert J. A.** RF propagation in mines and tunnels: extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, Vol. 57, No. 4. — P. 88–102.
19. **Sun H.-y. et al.** Wi-Fi network-based fingerprinting algorithm for localization in coal mine tunnel, *J. of Internet Technology*, 2017, Vol. 18, No. 4. — P. 731–741.
20. **Technical Report** of the geospatial information authority of Japan, Location of Osarizawa Mine in Japan, 2013 [Online].

*Поступила в редакцию 01/II 2019  
После доработки 02/IV 2019  
Принята к публикации 28/V 2019*