

УДК 654.1:622

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

**Касьяненко Д. Л.**, магистрант, гр. ТКС17зм,  
**Молоковский И. А.**, канд. техн. наук, доц., науч. рук.  
(ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк, ДНР)  
[ukrdmitry@gmail.com](mailto:ukrdmitry@gmail.com)

*В статье рассмотрены особенности использования беспроводной сенсорной сети на угольных шахтах. Указаны проблемы реализации беспроводной сенсорной сети в условиях подземных выработках угольных шахт. Решение таких вопросов позволит эффективно использовать беспроводные сенсорные сети для распределенного мониторинга и удаленного управления различными объектами и физическими процессами на угольных шахтах.*

**Ключевые слова:** горная выработка, передача информации, беспроводная сенсорная связь, WSN.

Беспроводные сенсорные сети (WSN – wireless sensor networks) используются в различных отраслях [1] благодаря постоянному совершенствованию сенсорных технологий, беспроводной связи, современной сетевой архитектуры и электроники стало возможным и их использование в горных выработках угольных шахт.

Современные средства WSN не только значительно повышают безопасность труда, но и способствуют оптимизации рабочего процесса, снижению затрат человеческих ресурсов, а также увеличивают коэффициент полезного действия горно-шахтного оборудования за счет сокращения простоев. Подземная радиосвязь контролирует и управляет производственными и технологическими процессами в шахте, обеспечивает нормальное функционирование горного оборудования.

Сущность WSN заключается в особом классе сетей, состоящих из большого числа распределенных в пространстве миниатюрных устройств (узлов) с автономным питанием, объединенных

между собой в единую сеть посредством беспроводного канала связи. Внедрение в данное устройство измерительных функций или функций взаимодействия со сторонним оборудованием делает возможным использование беспроводных сенсорных сетей для решения задачи распределенного мониторинга и удаленного управления различными объектами и физическими процессами [2].

Рассмотрим требования в организации подземной связи на горнодобывающих предприятиях [3]:

- 1) оперативным извещением о ЧС, возникновении опасных ситуаций, координацией поисково-спасательных групп;
- 2) длительным эксплуатационным сроком, и большим отрезком времени автономной работы от одного заряда аккумулятора;
- 3) простотой в монтаже дополнительных устройств, замене комплектующих, оперативном ремонте;
- 4) должным уровнем сигнала и безотказностью оборудования, стабильной передачей голосовых сообщений, анализом и сбором телеметрических данных;
- 5) простота в установке и обслуживании;
- 6) длительный срок эксплуатации и ремонтпригодность в местных условиях.

Возможность оперативно получать информацию о ходе выполнении работ значительно снижает вероятность возможных производственных ошибок и нарушения технологии производства работ, а также позволяет оптимизировать координацию проведения спасательных операций.

Повышение эффективности функционирования производства и снижение аварийности на горных предприятиях во многом определяются возможностями и состоянием используемых систем беспроводной связи с WSN.

Таким образом, цель данной статьи рассмотреть возможность использования беспроводных сенсорных сетей и их применение в подземных выработках угольных шахт.

В настоящее время за рубежом на некоторых угольных шахтах предпринимаются попытки внедрения технологии WSN [4]. WSN состоит из плотно расположенных узлов-сенсоров, обладающих возможностями измерения, обработки и передачи физической информации. Физическая информация может представлять собой данные любого типа, такие как температура, влажность,

концентрация метана, или может представлять собой просто передаваемые данные передатчиком. При использовании WSN в угольных шахтах имеются следующие отличительные характеристики по сравнению с обычными наземными предприятиями WSN [5]:

1) структура топологии сети определяется на основе горно-геологических условий;

2) узлы сети сильно ограничены в ресурсах, таких как, хранение и обработки информации, а также электропитания;

3) в шахте электромагнитные помехи больше чем на поверхности.

Упрощенная структура топологии сети WSN приведена на рисунке 1.

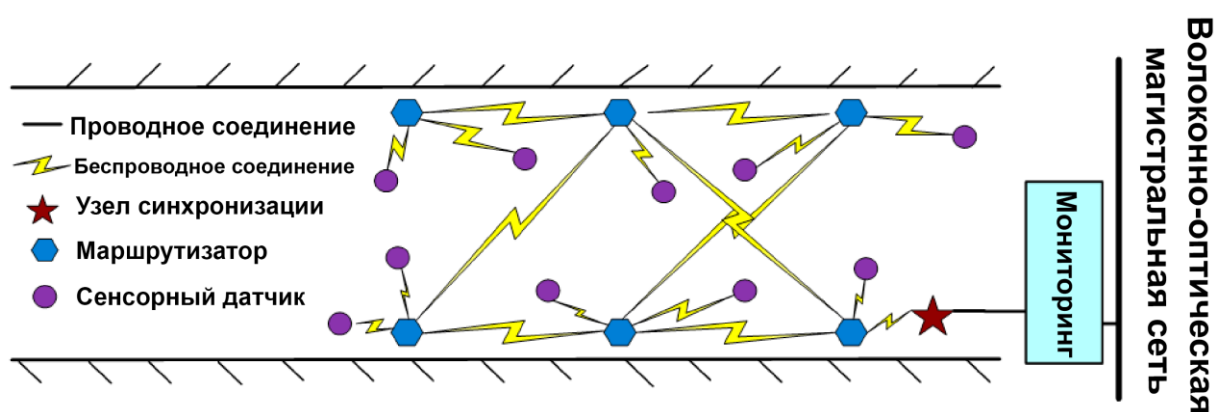


Рис. 1. Упрощенная структура топологии сети WSN

Общая надежность и эффективность WSN очень важны при использовании на шахтах, так как сеть состоит из нескольких плотно развернутых сенсорных узлов, которые оснащены собственными возможностями обработки данных и связи. Благодаря этому стало возможно использовать WSN для мониторинга шахтной обстановки в подземных выработках, а также для обнаружения и отслеживания местоположения шахтеров [6,7].

В общем случае применение WSN на шахтах можно классифицировать (рис. 2) на основе таких технологических функций контроля, как трекинг, мониторинг и вентиляция:

1) трекинг служит для определения: дислокации шахтеров в выработках, работы горно-шахтного оборудования и передвижения шахтного подземного транспорта;

2) мониторинг шахтной обстановки в выработках помогает определить концентрацию метана, концентрации вредных газов, влажности, пыли и температуры и т.д.;

3) вентиляция применяется для контроля проветривания горных выработок и измерения количества воздуха.

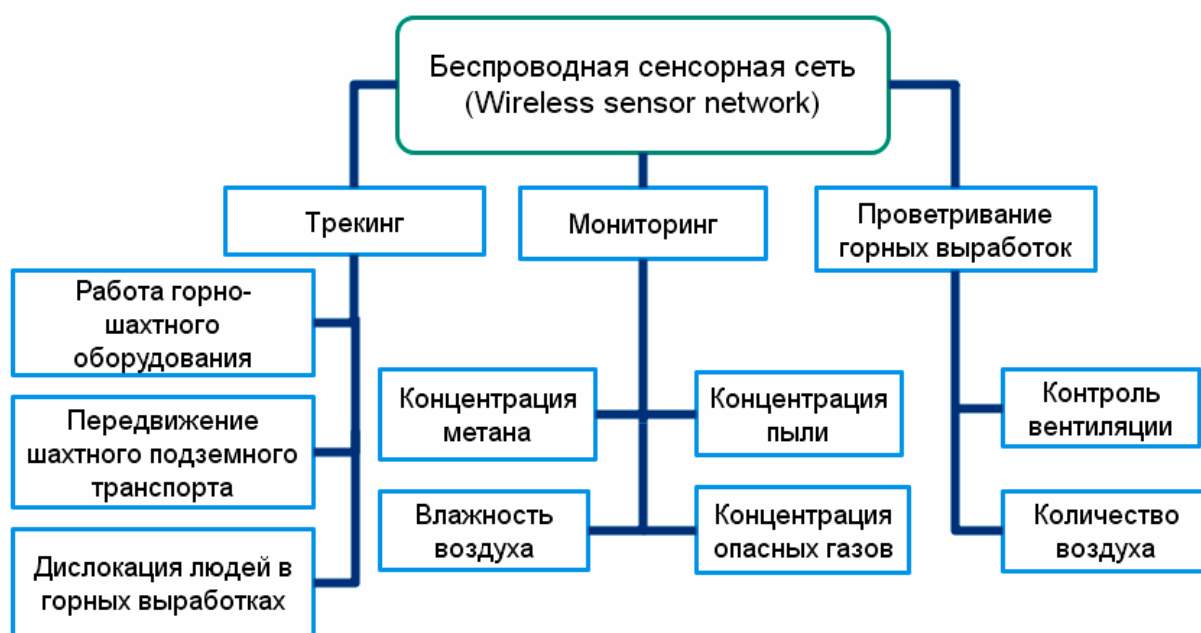


Рис. 2. Классификация применения WSN по технологическим функциям контроля на шахтах

Существуют несколько факторов, которые влияют на область применения WSN для выбора оптимальной частоты их работы в условиях шахты, прежде всего геометрия выработок и горно-геологические условия, также горношахтное оборудование создают электрические помехи. Поэтому правильный выбор частоты оказывает большое влияние на распространение сигналов. В таблице 1 перечислены некоторые диапазоны радиоволн частот, используемые для связи на горнодобывающих предприятиях.

Так, например, электрические помехи не создают высокого затухания для КНЧ, ОНЧ, НЧ. Построение систем, основанных на СЧ, требует антенн большего размера, чем системы с ОВЧ или УВЧ, а также отсутствует высокочастотный шум [8]. На УВЧ и ОВЧ горные выработки действуют как волновод для распростра-

нения сигнала. Диапазон СЧ имеет лучшую площадь покрытия по сравнению с диапазоном УВЧ с меньшим затуханием сигнала. Системы связи, основанные на разных частотах, имеют различную применимость и ограничения в шахтах. Хотя системы связи на основе УВЧ более привлекательны из-за стоимости, размера и простоты использования, их производительность зависит исключительно от линии прямой видимости между передатчиком и приемником.

Таблица 1

Общепринятые обозначения диапазонов радиоволн и их частоты

Название частоты	Диапазон частоты	Обозначение МСЭ
Крайне низкие частоты (КНЧ)	3–30 Гц	Extremely low frequency(ELF)
Очень низкие частоты (ОНЧ)	3–30 кГц	Very low frequency(VLF)
Низкие частоты (НЧ)	30–300 кГц	Low frequency (LF)
Средние частоты (СЧ)	300–3000 кГц	Medium frequency (MF)
Очень высокие частоты (ОВЧ)	30–300 МГц	Very high frequency (VHF)
Ультравысокие частоты (УВЧ)	300 МГц–3 ГГц	Ultra-high frequency (UHF)

Авторы [9] отмечают, что УВЧ или более высокие частоты обеспечивают большую площадь покрытия в ровном и без препятствий на пути по выработке. Тем не менее, они также предположили, что лучшая площадь покрытия может быть достигнута на частоте между СЧ-ОВЧ, где неоднородность, углы и сечение выработки более производительны для систем связи. Согласно [10], электрические свойства выработки варьируются от выработки к выработке, что приводит к колебаниям и ослаблениям рабочих частот. Таким образом, каждая горная выработка имеет свои параметры, которые влияют на производительность систем связи, поэтому необходимо определиться с частотами, поскольку мощность, необходимая для работы, и доступная полоса пропускания прямо пропорциональна рабочей частоте [11]. Таким образом, на

производительность систем связи сильно влияют следующие параметры горных выработок: наклон боковых стенок, сечения, кривизны и постоянные изменения горно-геологических и горно-технических условий. Изменение в распространении сигнала равно изменению размера поперечного сечения выработки, что приводит к затуханию сигнала [10]. Продольное затухание увеличивается из-за неравномерного сечения и неоднородности боков выработки. Кривизна выработки вносит некоторые дополнительные потери, которые сильно зависят от используемой частоты и некоторых других геометрических параметров, таких как ширина выработки, поляризация волны и радиус кривизны [8]. Свойства породы и металлов, а также частота сигнала распространяемой волны были использованы для определения потери мощности сигнала. Содержание воды, доступное из-за просачивания из толщи выработки, также является одним из факторов, который влияет на путь прохождения сигнала [11]. Так авторы [12] исследовали влияние неоднородности боковых стенок выработки и того, как она влияет на характеристики распространения беспроводного сигнала в шахте. Эксперимент проводился на частоте 900 МГц в реальных подземных условиях, и результаты моделирования были проверены и сравнены с методом импедансных каскадов. Полученные результаты показали, что распространение, отражение и дифракция являются основными вопросами, которые необходимо решать. Горная выработка состоит из множества элементов, таких как железнодорожные пути, силовые кабели, водопроводные трубы, горношахтное оборудование, системы вентиляции и т.д. которые существенно изменяют электромагнитные свойства выработки [13]. Наличие объектов в среде и мобильность узлов связи дают сравнительное преимущество в условиях распространения беспроводной и проводной связи. Движущиеся объекты, такие как шахтеры, транспортные средства и горная техника, создают проблемы, приводящие к увеличению потерь и распространения сигнала по выработке. Из-за вышеперечисленных проблем мощность сигнала значительно снижается. Было замечено, что что задержка распространения в безлюдной выработке составляла менее 25 нс и 103 нс, когда в выработке находились шахтеры, оборудование и транспортные средства. За-

держка и потери мощности сигнала снижают скорость передачи данных в выработке [14].

Все электронные устройства, в том числе и WSN, должны соответствовать правилам безопасности для использования их в угольных шахтах [3]. Основные требования для подземных систем связи на угольных шахтах приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные требования подземных систем связи на угольных шахтах

<b>Характеристики</b>	<b>Требования</b>
Размер	Система должна быть небольшого размера и быть легкой, чтобы ее можно было проще переносить
Конструкция	Прочность должна быть достаточной, чтобы противостоять ударам.
Безопасность	Система должна быть искробезопасна и с защитой от короткого замыкания
Защита	Пыле- и влагозащищенная, устойчива к коррозии, использование при высоких температурах
Надежность и отказоустойчивость	Должна всегда поддерживаться

Также представляет проблему распространения сигналов в условиях ведения горных работ, которые изменяются в связи с производственными процессами в горнодобывающей отрасли. Обеспечение такого полного охвата шахтного поля – сложная задача для исследователей. Топология сети WSN для развертывания может серьезно повлиять на проблему покрытия в подземных шахтах.

Авторы [15] отмечали различные проблемы с топологией в WSN под землей и пришли к следующему выводу:

1) на этапе размещения сенсорных узлов сети, каждый узел может быть установлен/убран либо по одному, либо в произвольном порядке;

2) после размещения узла сенсорной сети производятся наблюдения и сразу же возникают вопросы, связанные с топологией: инфраструктура как препятствие распространения сигнала, движущиеся объекты в выработке, помехи, изменение положения узла сети и воздействие окружающей обстановки на него.

Для получения желаемых функциональных возможностей сети используется от нескольких до тысячи узлов. Узлы сети могут размещаться на расстоянии нескольких метров друг от друга.

Такое большое количество узлов требует особой архитектуры размещения датчиков при проектировании системы мониторинга шахтной обстановки. Поскольку выработки в шахте постоянно меняются, узел связи и мониторинга должен поддерживать такую динамическую топологию для обеспечения надежного покрытия всех горных выработок [16]. Пример архитектуры системы мониторинга шахтной обстановки приведен на рисунке 3.

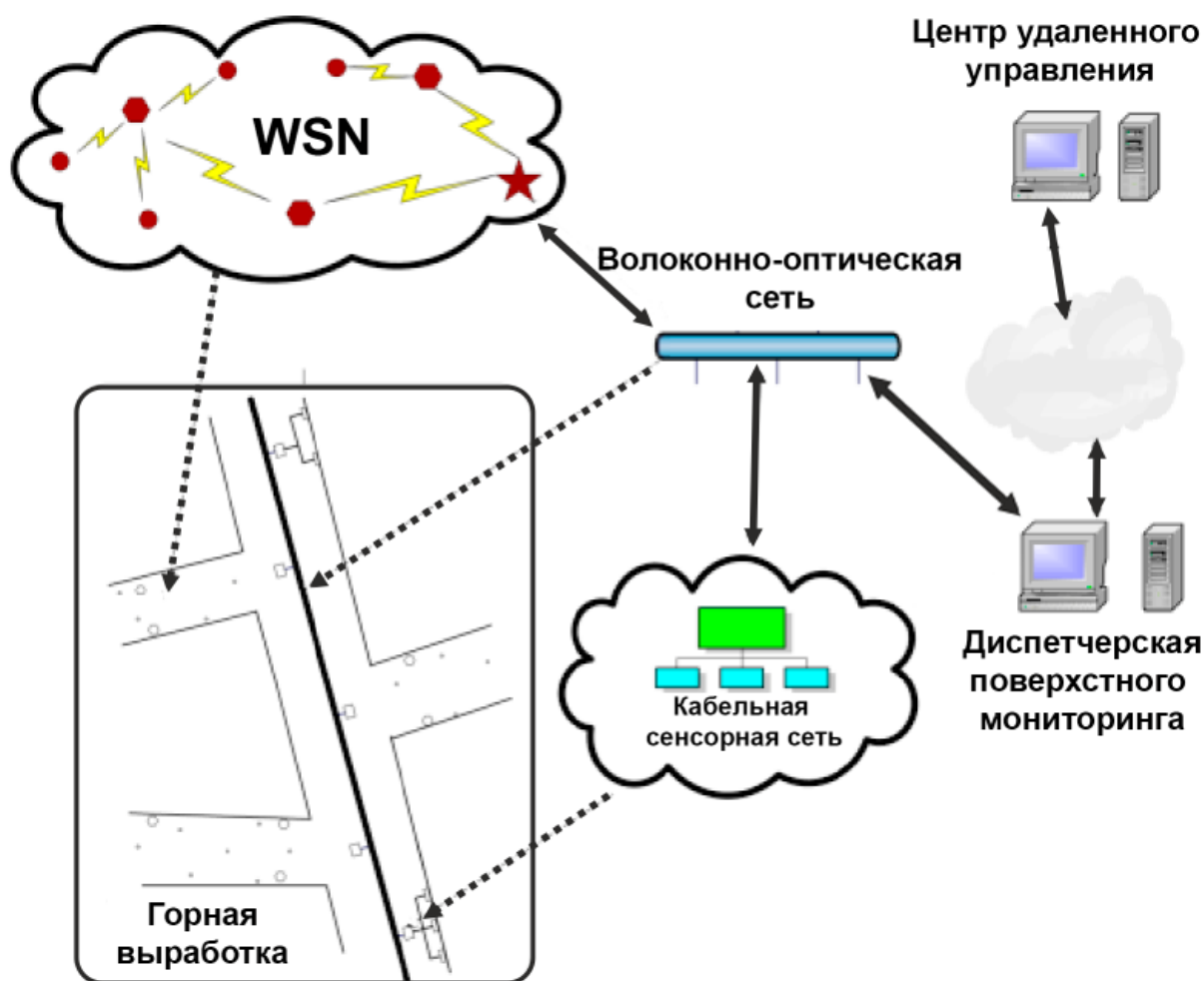


Рис. 3. Архитектура системы мониторинга шахтной обстановки

Синхронизация между узлами связи очень важна в подземной выработке. Неправильная временная метка среди узлов связи



может привести к серьезной ошибке в оценке местоположения и отслеживании в чрезвычайных ситуациях. Это может быть вызвано такими характеристиками как, колебания температуры, электромагнитные эффекты, задержка передачи и дисперсия, влияющая на скорость передачи данных. Это может значительно снизить согласованность между устройствами связи. Есть разные производители, которые занимаются системами связи для шахт. Конструкция и их устройство различны, а также обладают различными стандартами с точки зрения условий труда. Это приводит к сбоям в работе коммуникационной системы, поскольку пользователь вынужден использовать одну собственную систему, которая не может взаимодействовать с другим пользователем, имеющим другую систему [4].

**Выводы.** В связи с особенностями распространения радиоволн современные системы подвижной радиосвязи до недавнего времени под землей практически не использовались. Но в настоящее время, благодаря техническому прогрессу, построение системы подземной радиосвязи стало возможным. Для обеспечения решения всех современных задач по организации связи перечисленных выше требований недостаточно. Хотя исследования по WSN активно изучались и продолжают проводиться, чтобы сделать систему более эффективной с точки зрения надежности, энергопотребления, функциональной совместимости и масштабируемости, но внедрение их на шахтах все еще являются сложной задачей.

Тематика сенсорных беспроводных сетей еще недостаточно изучена, имеются на данный момент ряд нерешенных проблем и ограничений, но преимущества реализуемые одной сетью такие как передача речевого трафика и информации, циркулирующей в автоматизированных системах дистанционного контроля и управления. Это обуславливает необходимость внедрения в подземном пространстве шахт и рудников самых современных технологий беспроводной связи, характеризующихся возможностью высококачественной передачи значительных объемов оперативной информации при высокой надежности системы и самое главное – при необходимости, координирует спасателей и оповещает шахтеров об авариях.

## Библиографический список

1. Сергиевский, М. В. Использование беспроводных сенсорных сетей для сбора, передачи и обработки информации в системах мониторинга состояния объектов [Текст] / М. В. Сергиевский, С. Н. Сыроежкин // *Cloud of Science*. – 2016. – Т. 3. – №1. – С. 125–136.
2. Сидоренко, А. В. Использование беспроводных сенсорных сетей в задачах мониторинга техногенных объектов [Текст] / А. В. Сидоренко, К. С. Мулярчик // *Доклады БГУИР*. – 2015. – №7(93). – С. 83–86.
3. Правила безопасности в угольных шахтах (НПАОТ 10.0-1.01-16 опубликовано 20.05.2016 года, с изменениями от 07.07.2016) [Электронный ресурс]: Официальный сайт государственного комитета горного и технического надзора Донецкой Народной Республики – Режим доступа: <http://gkgtn.ru/images/ПРАВИЛА%20БЕЗОПАСНОСТИ%20НА%20УГОЛЬНЫХ%20ШАХТАХ.pdf> – Загл. с экрана. – 08.04.2019.
4. Ranjan, A. Performance evaluation of underground mine communication and monitoring devices: case studies. In *information systems design and intelligent applications* / A. Ranjan, H. B. Sahu, P. Misra // Springer, 2015. – pp. 685–694.
5. Niu, X. The design and evaluation of a wireless sensor network for mine safety monitoring / X. Niu, X. Huang, Z. Zhao // *Proceedings of the global telecommunications conference GLOBECOM*. – 2007. – pp. 1291–1295.
6. Chen, C. W. A chain-type wireless sensor network for monitoring long range infrastructures. In *Defense and Security* / C. W. Chen, Y. Wang, I. Kostanic // *International Society for Optics and Photonics*. – 2005. – pp. 444–455.
7. Stolkin, R. Using environmental models to optimize sensor placement / R. Stolkin, L. Vickers, J. V. Nickerson // *Sens. J. IEEE*. – №7(3) . – 2007. – pp. 319–320.
8. Bandyopadhyay, L. K. Studies on radio frequency propagation characteristics for underground coalmine communications. / L. K. Bandyopadhyay, P. K. Mishra, S. Kumar // *Indian Journal of Radio & Space Physics*. – 2007. – 418 p.
9. Delogne, P. *Leaky feeders and subsurface radio communication*. – Pergamon : London, 1982. – 283 p.
10. Schiffbauer, W. H. Coal mine communications / W. H. Schiffbauer, J. F. Brune // *American Long wall Mag*. – Aug, 2006 – pp. 24–25.
11. Griffin, K. R. Designing and modeling wireless mesh communications in underground coal mines // K. R. Griffin, S. J. Schafrik, M. Karmis / *Proceedings of the SME Annual Meeting*. – Feb. 28-Mar. 03. – 2010. – pp. 1–4.

11. Peplinski, N. R. Dielectric properties of soils in the 0.31.3-GHz range. // N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, M. C. Dobson / Geosci Remote Sens IEEE Trans On. – №33(3) . – 1995. – pp. 803–807.

12. Ndoh, M. A novel approach to propagation prediction in confined and diffracting rough surfaces / M. Ndoh,, G. Y. Delisle, R. Le // Int. J. Numer. Model Electron Netw. Devices Fields. – №16(6). – 2003. – pp. 535–555.

13. Chen, G. Design and performance analysis of wireless sensor network location node system for underground mine / G. Chen, C. Shen, L. Zhou // Min. Sci. Technol. China. – №19. – 2009. – pp. 813–818.

14. Hamalainen, M. Wideband radio channel measurement in a mine / M. Hamalainen, J. Talvitie, V. Hovinen, P. Leppanen // Proceedings of the 1998 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. – 1998. – pp. 522–526.

15. Akyildiz, I. F. Wireless sensor networks: A survey // I F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci / Computer Networks. – №38(4). – 2002. – pp. 393–422.

16. Zhang, Y. An integrated environment monitoring system for underground coal mines – wireless sensor network subsystem with multi-parameter monitoring / Y. Zhang, W. Yang, D. Han, YI. Kim // Sensors (Basel). – №14(7). – 2014 – pp. 13149–70

**Kasyanenko D. L., Molokovsky I. A.**

(SEI HPE «Donetsk national technical university», Donetsk, DPR)

## **FEATURES OF THE USE OF THE WIRELESS SENSOR NETWORKS AND THEIR EXPLOITATION IN THE UNDERGROUND TUNNELS OF COAL MINES**

*The article consider the possibility of using a wireless sensor network and their exploitation in underground tunnels of coal mines. The problems of implementing a wireless sensor network in underground tunnels of coal mines are indicated. The solution of such issues will allow the effective use of wireless sensor networks for distributed monitoring and remote control of various facilities and physical processes in coal mines.*

**Keywords:** underground tunnel, information transfer, wireless sensory communication, WSN