

DOI 10.31343/1029-7812-2019-16-1-227-238

ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ГАЗОВОЙ ЭМИССИИ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Е.И. Чесалова, А.М. Асавин

Выполнен проект по созданию современной технологии долгосрочного экологического мониторинга состояния воздушной среды в разных природных условиях на основе беспроводных сенсорных сетей. При проведении работ спроектирован аппаратно-программный комплекс мониторинга и изготовлена аппаратура, состоящая из узлов сети и уникальных газовых датчиков. В результате получена распределенная, самоорганизующаяся и устойчивая к отказам отдельных элементов сеть из миниатюрных вычислительных устройств с автономными источниками питания. Узлы такой системы транслируют сообщения друг через друга, обеспечивая значительную площадь покрытия при малой мощности передатчика. Испытания системы в условиях г. Москвы показали, что систему можно использовать для мониторинга загрязненности воздуха крупных городов. В более экстремальных условиях система успешно испытана в Арктике на Кольском полуострове: в подземном руднике Карнасурт в Ловозерском массиве и на поверхности Хибинского массива. Установлено, что разработанная технология экологического мониторинга позволяет с большой дискретностью и точностью проводить наблюдения даже в непосредственной близости от зоны взрывных работ.

Ключевые слова: экологический мониторинг, газовые выбросы в атмосферу, беспроводные сенсорные сети, мегаполис, горные выработки.

Введение

Изменение состава и других параметров атмосферы, происходящие за счет как природных, так и антропогенных факторов, оказывают разнообразное, преимущественно неблагоприятное воздействие на экосистемы. Особенно такие изменения заметны в высоких широтах Северного полушария, где рядом исследований установлен планетарный максимум основных парниковых газов – диоксида углерода и метана (Сергиенко и др. 2011), при минимальной доле в нем антропогенной составляющей.

Другой актуальной проблемой современности является глобальная убыль стратосферного озона и образование так называемых озоновых дыр. Из всех гипотез, объясняющих причины разрушения озонового слоя Земли, больше других известна техногенно-фреоновая. Однако наиболее перспективной представляется водородная гипотеза, суть которой заключается в том, что из отдельных геологических структур происходят выбросы глубинных озоноразрушающих газов, в первую очередь – метана, и в меньшей степени –

водорода (Сывороткин 2002, Нивин 2009). К таким структурам могут относиться поля разрушающихся газогидратов, выходящих на поверхность, районы добычи природного газа и углеводородов, области развития болот с микроорганизмами, генерирующими метан и водород, и области развития ультраосновных массивов, на которых развиваются процессы серпентинизации.

Есть основания предполагать, что одним из таких центров являются Хибинский и Ловозерский ультращелочные массивы, эманациями водорода и метана с поверхности которых могут быть обусловлены периодически возникающие отрицательные аномалии общего содержания озона над территорией Кольского полуострова и Белого моря. Однако, из-за отсутствия прямых наблюдений, эта гипотеза пока не имеет подтверждения. Для решения проблемы необходимо проведение натурных исследований, изучение и учет различных факторов, влияющих на динамику эманаций не только литосферных газов, но и колебаний содержания озона.

Существует и другой аспект рассматриваемой проблематики – горючие и взрывоопасные компоненты свободно выделяющихся газов, которые при определенных условиях могут накапливаться в атмосфере подземных рудников, эксплуатирующих уникальные апатитовые и редкометалльные месторождения Хибинского и Ловозерского массивов. Это может серьезно нарушить технологический цикл ведения горных работ, так как создает угрозу здоровью и жизни горняков. Для прогнозирования повышенных газовыделений необходимо установить их пространственно-временные вариации и выявить закономерности в этом процессе.

Ввиду того, что эпизодические замеры газовой эмиссии в ходе кратковременных полевых работ не позволяют правильно и всесторонне оценить все факторы, влияющие на вклад литосферных эманаций в общий состав атмосферы, организация комплексного долговременного мониторинга является единственно возможным способом для продвижения в направлении решения описанных проблем.

Именно поэтому главной целью описываемой работы была разработка и реализация технологии долговременного наблюдения за газовой эмиссией в рамках экологического мониторинга, в том числе с возможностью ее использования в сложных условиях наблюдений подземных рудников Арктической зоны России. Для ее достижения авторы использовали новые информационные технологии на основе беспроводных сенсорных сетей (БСС). Впервые БСС были созданы немного более десяти лет назад и буквально вызвали революцию в методиках мониторинга (Varonti et al. 2007, Mythili et al. 2016). Национальный научный фонд США в 2010 г. объявил эту технологию

крупнейшим открытием в области наук о Земле. Вскоре, уже в 2013 г., вышла книга с описанием большого количества проектов, использующих БСС (Industrial... 2013). В России по этой проблематике пока выполнено только несколько пилотных теоретических работ (Молчанов 2006, Кисляков и др. 2012).

БСС представляет собой распределенную, самоорганизующуюся и устойчивую к отказам отдельных элементов сеть миниатюрных вычислительных устройств с автономным источником питания. Узлы такой системы транслируют сообщения друг через друга, обеспечивая значительную площадь покрытия сетью при малой мощности передатчика. Основа сети – миниатюрные вычислительно-коммуникационных устройства – моты (от англ. mote — пылинка). Мот представляет собой миниатюрную плату, на которой размещаются процессор, память, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и датчики. Обмен информацией между узлами системы происходит по беспроводным каналам связи по протоколу ZigBee. Данный протокол предоставляет возможности реализации беспроводной связи с низким энергопотреблением. Информация с узлов собирается в шлюз и далее в информационную сеть.

Методика исследований

Для реализации проекта были выбраны новые российские разработки в области микроэлектроники и передачи данных. Для передачи данных авторы использовали платформу MeshLogic (Официальный сайт ...), которая была разработана на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана. Беспроводные OEM-модули ML-Module-Z (Баскаков 2012) представляют собой законченное интегрированное решение. В модули встроена специальная версия сетевого стека MeshLogic, оптимизированная для построения распределенных систем сбора информации, в которых множество устройств передает данные в одну или нескольких точек сбора (базовых станций, шлюзов и т.п.).

Главная особенность модулей ML-Module-Z заключается в том, что все они равноценны и являются маршрутизаторами, то есть способны в случае необходимости ретранслировать пакеты, но при этом автоматически переходят в «спящий» режим, значительно сокращая среднее энергопотребление и увеличивая срок службы элементов питания.

Далеко не все представленные на рынке решения для БСС позволяют создавать полноценные mesh-сети, в которых все узлы могут выполнять ретрансляцию при работе от автономных элементов питания.

Разработанная в проекте сеть мониторинга представляет собой аппаратно-программный комплекс для организации беспроводной радиочастотной сети, обеспечивающей как автоматический сбор данных от распределенных в пространстве датчиков, так и обработку телеметрической информации.

Основными функциями системы являются:

- организация распределенной беспроводной сети передачи информации;
- автоматический сбор по радиоканалу показаний датчиков;
- накопление собранной информации в энергонезависимой памяти (архиве);
- чтение информации из архива по запросу от сервера или вышестоящей системы для ее отображения, обработки и анализа.

В состав аппаратно-программного комплекса входят (рис. 1):

- беспроводные узлы;
- модули сопряжения;
- датчики;
- беспроводной шлюз;
- сервер;
- специализированное программное обеспечение.

Совокупность беспроводных узлов и подключенные к ним через модули сопряжения внешние датчики образуют сенсорную сеть.

С помощью шлюза информация, собранная беспроводной сетью, передается на сервер или вышестоящей системе для последующей обработки. Передача информации от шлюза может осуществляться по проводным или беспроводным каналам связи. Для организации беспроводного канала связи может в ряде случаев использоваться инфраструктура операторов сотовой связи.

Модули сопряжения предназначены для подключения к беспроводному узлу внешних датчиков и выполняют подачу электропитания на датчики, а также согласование их выходных сигналов с измерительной системой беспроводного узла. В нашем случае – это высокоточные датчики водорода и метана, а также климатические датчики: температура, влажность, давление, необходимость которых обусловлена тем, что эмиссия газа сильно зависит от погодных условий.

Система автономного электропитания беспроводных узлов обеспечивает питание как внутренних блоков, так и выносных датчиков в импульсном режиме, то есть узел большую часть времени находится в режиме пониженного энергопотребления (в «спящем» режиме).

Универсальная модульная конструкция беспроводного узла ML-SM-N позволяет установить в каждый узел до 4 модулей сопряжения

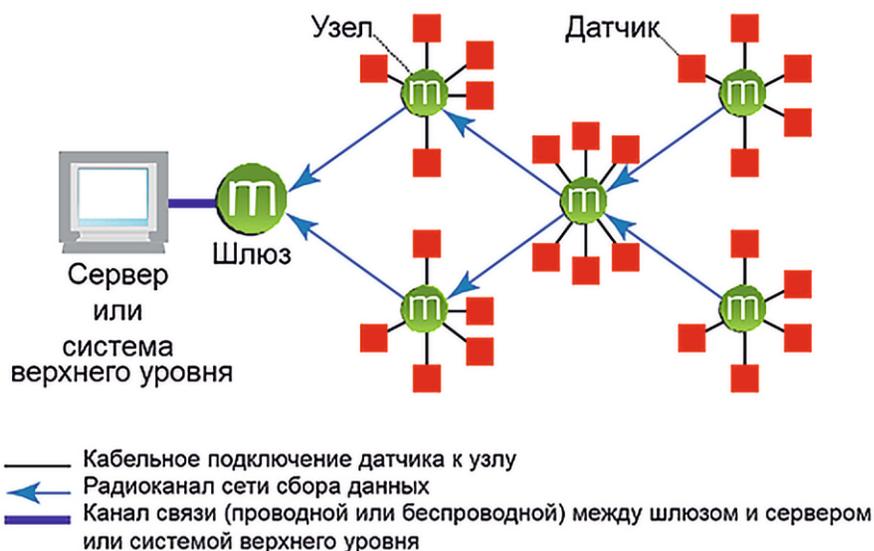


Рис. 1. Принципиальная схема беспроводной системы мониторинга, разработанная в описываемом проекте

с различными типами датчиков в любом порядке и в произвольных комбинациях. Таким образом, каждый беспроводной узел ML-SM-N является многоканальной (до 64 внешних каналов) измерительной системой с гибкой конфигурацией, которую можно изменять в процессе эксплуатации. Имеется также возможность автоматического определения пространственного положения узла, что позволяет в случае выхода из строя отдельного узла перестроить топологию сети.

Газовые датчики для анализа водорода и метана, использованные в нашей системе мониторинга, являются уникальной разработкой кафедры физики твердого тела и наносистем НИЯУ МИФИ (Николаев и др. 2007). Разработанные газовые сенсоры типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) основаны на явлении изменения проводимости в слоистых наноструктурах в зависимости от состава сорбированного из окружающей атмосферы молекул газа. Технология изготовления чувствительного элемента представляет собой сочетание микроэлектронной технологии изготовления транзисторов и лазерной технологии напыления тонких пленок. Диапазон концентраций для измеряемых газов составляет 10^{-1} – 10^4 ppm. Чувствительный элемент можно использовать в диапазоне температур окружающей среды от -30 до $+40$ °C при влажности от 30 до 90%. Эти датчики

были адаптированы к решению нашей задачи: было уменьшено энергопотребление, добавлена возможность удаленной установки режима наблюдения и тестирования работоспособности, повышена защищённость от влажности и колебания температур, форма корпуса приспособлена к сложным условиям подземных шахт, где проводятся взрывы. Тестирование и оценка качества работы газоанализатора проводились на вакуумной установке, предоставленной ГЕОХИ РАН.

Результаты и их обсуждение

Опытные испытания системы проводились как в городских условиях, так и в полевых. В Москве авторы использовали два полигона для сравнения загрязненности воздуха: центр города (ул. Моховая) и один из наиболее чистых районов – парк на Воробьевых горах. Здесь были получены многомесячные непрерывные данные по вариациям содержаний водорода и метана в атмосфере мегаполиса. Водород, как летучий компонент, позволяет даже на короткопериодических вариациях отслеживать колебания загрязненности, в том числе и по сложным ароматическим углеводородам, которые опасны способностью усиливать мутагенность в живых организмах. На основе работы сенсоров было получено около одного миллиона записей измерений. Эта информация дала возможность создать структуру базы данных для хранения полученной информации мониторинга, а также разработать технологию сбора сведений для непрерывного пополнения этой базы данных. Собранные данные показали сильную зависимость содержания водорода от общей загрязненности атмосферы (рис. 2). Были выявлены также зависимости от времени года (повышенные в зимний период), времени суток, погодных условий.

Полевые испытания установки в более экстремальных условиях проводились на опытном полигоне в подземном редкометалльном руднике Карнасурт (Ловозерский массив, Кольский п-ов), где измерялись концентрации свободно выделяющихся газов – водорода и метана (Асавин и др. 2015, 2017, Чесалова и др. 2017). Для этого было использовано десять беспроводных узлов ML-SM-N (рис. 3), из которых два узла служили трансляторами, а на остальных были установлены датчики газа. Датчики были расположены в штреках №11 и №13, в которых производилась активная отработка руды с использованием буровзрывных работ.

В сегментах сети, использованных на руднике, располагалось 3-5 узлов. Это было необходимо, чтобы провести испытание работы системы на разных рабочих частотах: 2.4 ГГц и 870Мгц. Сегмент сети,

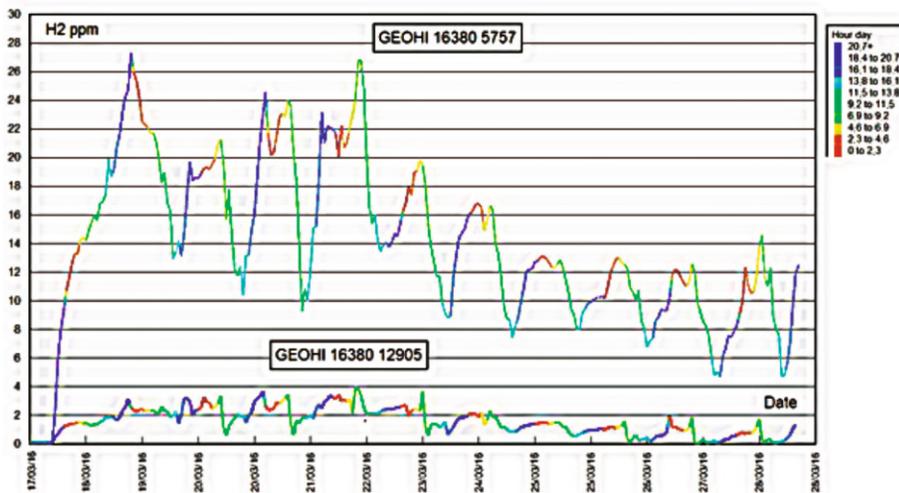


Рис. 2. Пример хода водорода для пункта наблюдения на Воробьевых горах. Приведены данные узлов, расположенных на разном расстоянии от дороги. Наблюдается резкое снижение уровня в пункте 12905 при полной синхронности колебаний содержаний водорода

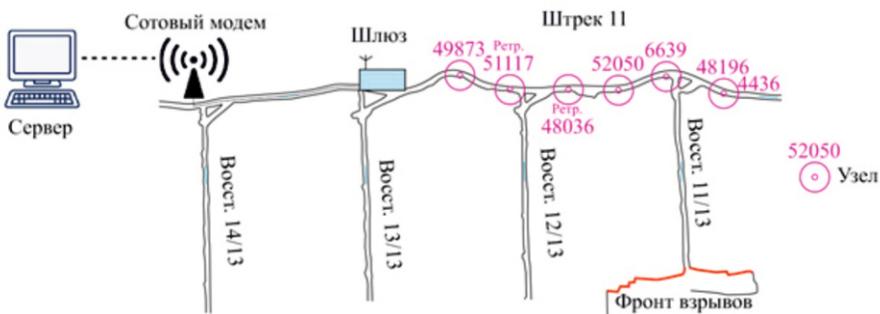


Рис. 3. Расположение узлов для длительного мониторинга в рудном штреке №11

ответственный за проведение измерений, организован следующим образом: в зоне максимально близкой к зоне взрыва располагается сенсор, соединенный по кабелю с узлом сети, в котором установлена радиоаппаратура управления сенсором, система сбора данных и передачи информации на соседний узел и далее до центрального узла.

Два штрека, в которых проводились испытания, существенно отличались по степени обводненности: в верхнем штреке (№11) она

была максимальной. Это создавало самые неблагоприятные условия для радиосвязи. При выбранной частоте радиосигнала 780 МГц расстояние устойчивой передачи составило только 50-100 м. Применяя специализированные антенны дистанцию можно увеличить примерно в 1.5 раза. При испытаниях алгоритм передачи данных отрабатывал ситуацию потери сигнала и отложенной передачи информации. Система ретрансляции и перестройки маршрутной карты сети работала в предполагаемом режиме, обеспечивая надежную передачу данных в пределах сегмента.

Для передачи информации в созданную сеть использовались возможности сотовой связи. Далее информация автоматически передавалась в базу данных, где происходила ее первичная обработка. Для визуализации данных в пространстве и времени была разработана геоинформационная система (ГИС). В ГИС-проекте представлено положение датчиков (имеется возможность автоматического определения пространственного положения узла), топология сети (от какого узла к какому идет передача сигнала), система выработок, положение фронта ведения взрывных работ (фронт перемещается), подробная геологическая карта массива. В программном обеспечении предусмотрена система оповещения в экстренных случаях: при превышении допустимой концентрации газов рассылаются смс-сообщения. Также разработана программа математической обработки временных рядов. Таким образом, образуется единая информационная система получения, передачи, хранения, анализа и визуализации данных мониторинга.

Типичные пики содержания водорода, связанные со взрывами, представлены на рис. 4. Взрывные работы проводят обычно один раз в сутки примерно в одно и то же время. Однако, например, 29.08 взрывы не проводились, и пик отсутствует. Снижение содержания водорода происходит достаточно быстро, что свидетельствует об эффективной системе вентиляции в горных выработках. В то же время, нашими измерениями установлена очень значительная разница между фоновым и пиковым содержаниями водорода, что стало ранее не известным и неожиданным фактом. Даже в нашем, ограниченном по времени интервале мониторинге, пиковые концентрации превышали фоновые значения до 800 раз. Эти данные указывают на возможность появления в воздухе выработки критических опасных содержания водорода сразу после взрыва, что чревато возникновением неконтролируемой взрывоопасной ситуации.

Также было выяснено, что газовая эмиссия горных пород значительно зависит от их состава. Наземные испытания, установившие этот факт, проводились авторами с помощью газовых датчиков

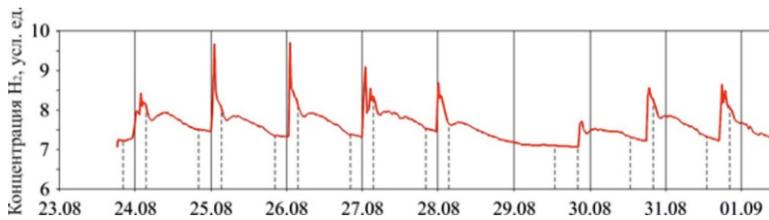


Рис. 4. Временной ряд мониторинга содержания водорода в атмосфере на одном из узлов 11 штрека (содержания в $10^{-4}\%$). Пунктирными вертикальными линиями обозначены начало и конец взрывных смен

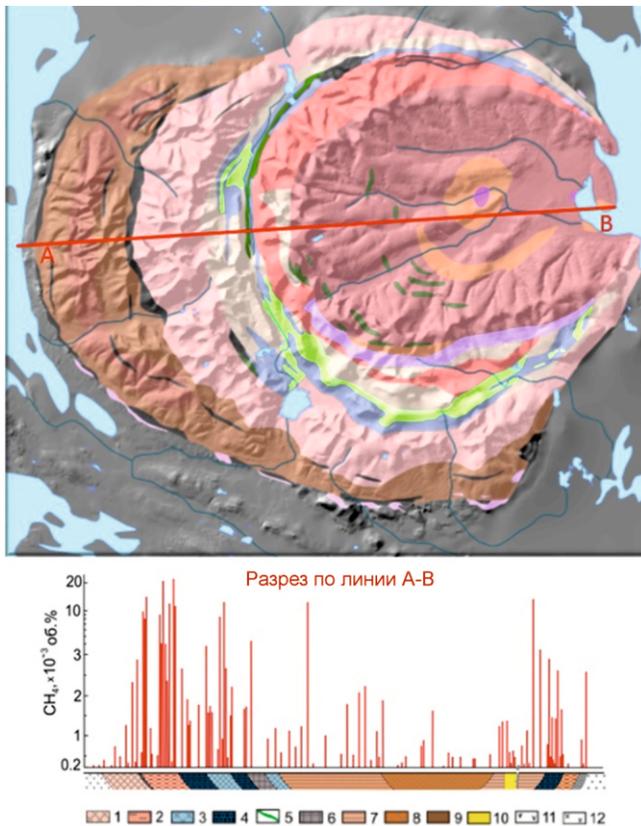


Рис. 5. Геологическая карта Хибинского массива и вариации средних содержаний метана по обобщенному субширотному профилю в его пределах. На основе анализа трехмерной модели рельефа массива было выявлена существенная зависимость эманации газа от его геоморфологии.

1-12 - Породы массива: 1, 2 - хибиниты массивные и трахитоидные, 3 - рихсчориты, 4 - ийолит-уртиты, 5 - апатит-нефелиновые руды, 6 - лясчорриты, 7 и 8 - фойяиты трахитоидные и массивные, 9 - щелочные сиениты, 10 - карбонатиты, 11 - протерозойские вулканиты, 12- гнейсо-граниты

на Хибинском массиве (рис. 5). Анализ длительных измерений показал нестабильность газовыделения и в горных выработках рудника Карнасурт (рис. 6). Обработка рядов данных методом фликкершумовой спектроскопии выявил набор нескольких резонансных частот – годовых и суточных (Нивин и др. 2018).

Полный анализ полученных данных еще предстоит сделать, но в целом работа показала хорошие перспективы использования БСС для экомониторинга газовых примесей в разных условиях наблюдений, вплоть до экстремальных в добычных выработках подземных рудников Крайнего Севера.

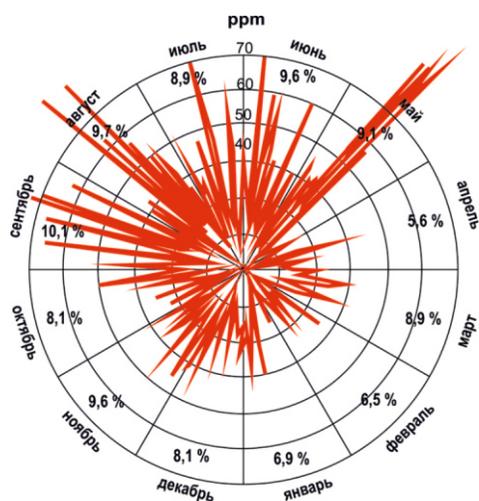


Рис. 6. Сезонные вариации концентрации водорода в годовом цикле в горных выработках рудника Карнасурт

Заключение

Работы, проведенные авторами, являются пионерскими по использованию БСС для целей экомониторинга в России. Более того, предложенная полнообъемная реализация системы мониторинга – от разработки аппаратуры сенсоров до ГИС-приложений для визуализации данных – является первой и среди известных нам зарубежных проектов.

Отработанные технические и технологические решения и созданные опытные полигоны могут быть в дальнейшем использованы как опытно-методические площадки для развития данных технологий. Получены новые, ранее неизвестные данные по естественным и искусственным эманациям вредных газов в атмосферу в различных условиях. Найденные решения можно использовать не только как инструмент для научных исследований, но и для обеспечения безо-

пасности в горнорудной, нефтяной, газовой промышленности и др.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта ГГМ РАН в программе Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» (2014-2017).

Литература

Асавин А.М., Нивин В.А. Организация геоэкологического мониторинга газовой эмиссии в Арктике: методики и перспективы современных беспроводных технологий // Арктика. Экология и экономика 2015, №3(19). С. 30-39.

Асавин А.М., Пуха В.В., Нивин В.А., Чесалова Е.И. Оценка газовыделения (H_2 - CH_4) после взрывных работ в шахте методами непрерывного дистанционными мониторинга (WSN) // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ВЕСЭМПГ-2017. 10 с.

Баскаков С.С. Построение систем телеметрии на основе беспроводных сенсорных сетей. // Автоматизация в промышленности, 2012, №12. С. 30-36.

Кисляков М.А., Мосин С.Г., Савенкова В.В. Проектирование беспроводных сенсорных сетей / Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 8. С15-19.

Молчанов Д.А. Самоорганизующиеся сети и проблемы их построения // Электросвязь, 2006, № 6. С. 20-22.

Нивин В.А. Диффузно-рассеянные водородно-углеводородные газы в породах нефелин-сиенитовых комплексов // Геохимия. 2009. №7. С. 714-733

Нивин В.А., Пуха В.В., Ловчиков А.В., Рахимов Р.Г. Особенности и факторы временных вариаций выделения водорода на Ловозерском редкометальном месторождении (Кольский полуостров) // Геохимия-2018, №7. С. 661-675.

Николаев И.Н., Литвинов А.В., Емелин Е.В. Возможности использования МДП-сенсоров в качестве чувствительных элементов газоанализаторов // Датчики и системы, 2007, №.5. С. 66-73.

Официальный сайт Компании «МешЛоджик» URL: [https:// www.meshlogic.ru](https://www.meshlogic.ru) (дата обращения 8 июля 2019)

Сергиенко В.И., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Эмиссия метана и углекислого газа на Восточно-Сибирском шельфе – фактор глобальных климатических изменений // Материалы выездного совместного совещания Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных НЦ РАН и научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики, г. Архангельск. 2011. С.117-136.

Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. 250 с.

Чесалова Е.И., Баскаков С.С., Асавин А.М. «Использование технологий беспроводных сенсорных сетей для создания автономного долговременного мониторинга эмиссии литосферных газов в условиях Арктики» // Геоинформатика, 2017, № 4. С. 7-12

Baronti P., Pillai P., Chook V.W.C., Chessa S., Gotta A., Y. Fun Hu. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. // Computer Communications, 2007. P. 1655–1695

Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, Standards. V.C. Gungor and G.P. Hancke (Eds.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013. 460 p.

Mythili T., Priyanka R.D., Sabitha R. Superior Technique to Cluster Large Objects // International Research J. Engineering and Technology, 2016, v. 3.P. 564-568.

THE TECHNOLOGY OF A LONG-TERM ENVIRONMENTAL MONITORING OF GAS EMISSION BASED ON WIRELESS NETS OF A NEW GENERATION

E.I. Chesalova, Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences (SGM RAS, Russia); e.chesalova@sgm.ru

A.M. Asavin, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences; aalex06@inbox.ru

The aim of our work is organization of a long-term ecological monitoring of the atmosphere condition in the area of active ore mining on the base of modern WSN (wireless sensor network) technologies. WSN is a spatially distributed autonomous and resistant to separate elements failures network of diminutive calculating devices with autonomous supply. The nodes of such system compile messages through each other, providing a significant network coverage with the low transmitter capacity. The information exchange between the system nodes are by wireless connection channels in accordance with ZigBee protocol. This protocol gives possibilities of wireless connection with the low power consumption. The project includes the development of informational and analytical monitoring system, the instruments consisting of the WSN nodes and unique gas sensors. The field tests were at monitoring polygon in Karnasurt underground mine (Lovozero massif, Kola Peninsula). The developed monitoring method allows carrying out measurements directly in the zone of blasting operations with the high discreteness and precision.

Key words: environmental monitoring, atmospheric gases, wireless sensor network.