

Е.И. Чесалова, С.С. Баскаков, А.М. Асавин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНОГО ДОЛГОВРЕМЕННОГО МОНИТОРИНГА ЭМИССИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ГАЗОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ



Введение

Целью работы была разработка и реализация геоинформационной технологии наблюдения за состоянием окружающей среды и газовой эмиссии в условиях Арктической зоны России.

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. Так, именно в атмосфере Арктики зарегистрирован планетарный максимум основных парниковых газов – диоксида углерода и метана (Сергиенко и др., 2011 и др.), где антропогенная его составляющая минимальна.

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, а наиболее перспективной представляется «водородная», 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.

Предполагается, что одним из таких центров являются Хибинский и Ловозерский массивы, эманициями водорода и метана с поверхности которых могут быть обусловлены периодически возникающие отрицательные аномалии поля общего содержания

озона над территорией Кольского полуострова и Белого моря. Однако, в том числе из-за отсутствия прямых наблюдений и доказательства влияния зафиксированных эманиций литосферных газов на формирование конкретной озоновой аномалии, сама такая возможность подвергается сомнению. Очевидна необходимость продолжения исследований в этом направлении, изучение и учет различных факторов, влияющих на динамику эманиций не только литосферных газов, но и колебания содержаний озона.

Другой аспект – горючие и взрывоопасные компоненты, свободно выделяющихся газов, при определенных условиях они могут накапливаться в атмосфере подземных рудников, эксплуатирующих уникальные апатитовые и редкометалльные месторождения на Кольском полуострове, серьезно нарушая тем самым технологический цикл ведения горных работ и создавая угрозу здоровью и жизни горняков. Для прогнозирования повышенных газовыделений необходимо установить закономерности их пространственно-временных вариаций.

Все выше перечисленное обуславливает необходимость организации комплексного долгосрочного мониторинга. Эпизодические замеры газоразделения в ходе кратковременных полевых работ не позволяют правильно и всесторонне оценить все факторы, влияющие на вклад литосферных эманиций в общий состав атмосферы.

Для организации долгосрочного мониторинга газовой эмиссии использовались новые технологии организации мониторинга окружающей среды на основе беспроводных сенсорных сетей (БСС). В России пока было выполнено только несколько теоретических работ пилотного типа (Мочалов, 2011; Тараканов, 2012; Богомоллова & Маликов, 2012; 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-коммуникационные устройства – моты (от англ. *moten* – пылинки, отсюда название технологии «умная пыль»). Мот представляет собой плату размером обычно не более одного кубического дюйма. На плате 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 IT-сеть (рис. 1).

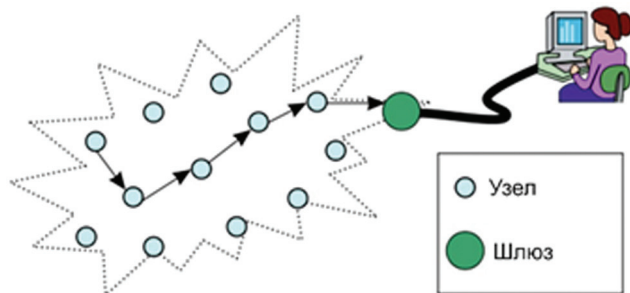


Рис. 1. Беспроводные сенсорные сети

Методы

Для решения этой задачи были выбраны новые разработки в области микроэлектроники и передачи данных – WSN (Wireless Sensor Network) – автономные беспроводные сенсорные сети

Мы использовали российскую разработку – платформа MeshLogic (www.meshlogic.ru), которая была разработана на базе института им. Н.Э. Баумана. Отличие MeshLogic от других продуктов заключается в собственном стеке сетевых протоколов, который обеспечивает следующие ключевые преимущества:

- полностью многоячейковая топология сети;
- все узлы равноправны и являются маршрутизаторами;
- самоорганизация и автоматический поиск маршрутов;
- устойчивость к соканальной интерференции;
- высокая масштабируемость и надежность доставки данных;

- возможна работа всех узлов от автономных источников питания.

Беспроводные OEM-модули ML-Module-Z [3] 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.

Заметим, что 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 сеть мониторинга представляет собой аппаратно-программный комплекс для организации беспроводной радиочастотной сети, обеспечивающей автоматический сбор данных от распределенных в пространстве датчиков, 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. 2):

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

Совокупность беспроводных узлов с подключенными к ним через модули сопряжения внешними датчиками образует сенсорную сеть.

С помощью шлюза информация, собранная беспроводной сетью, передается на сервер или вышестоящей системе для последующей обработки. Передача информации от шлюза может осуществляться

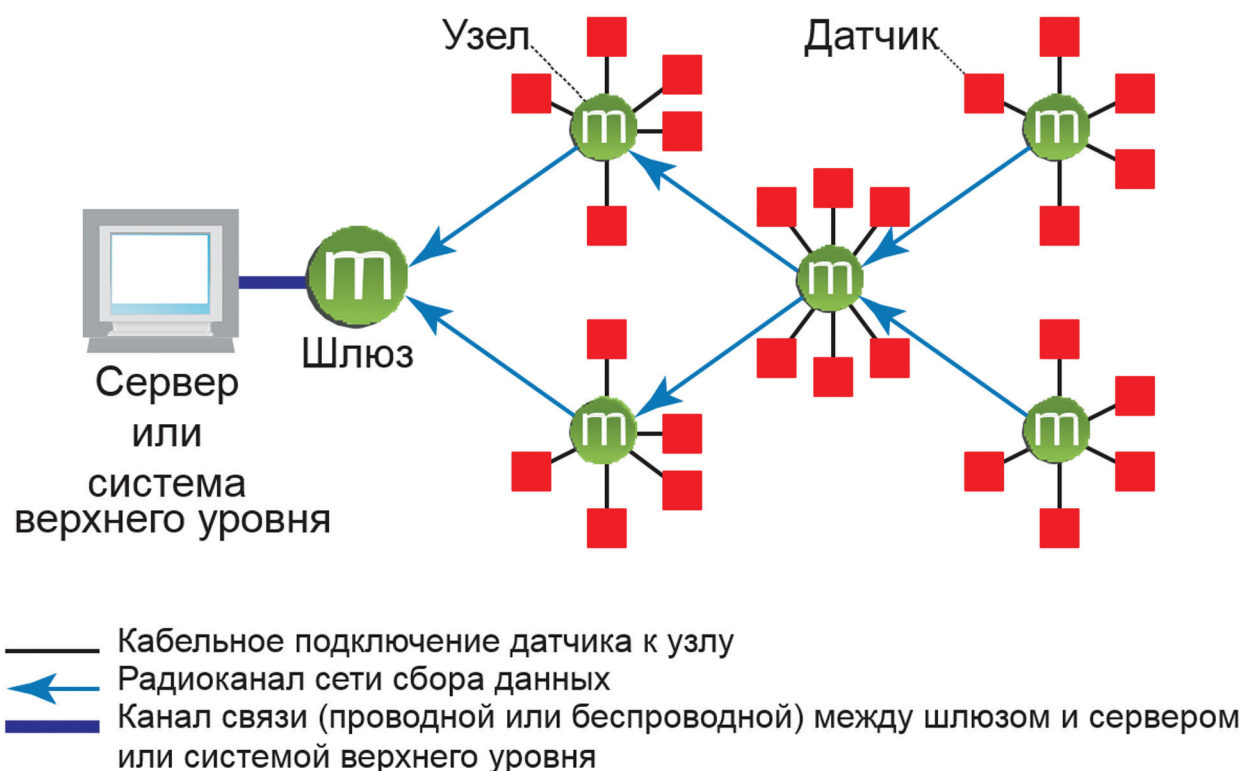


Рис. 2. Общая схема беспроводной системы мониторинга

по проводным или беспроводным каналам связи. Для организации беспроводного канала связи в ряде случаев может 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 (эмиссия газа сильно зависит от климатических условий). Газовые датчики, использованные в нашей системе мониторинга, являются уникальной разработкой кафедры физики твердого тела и наносистем МИФИ (Николаев и др., 2007).

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 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 возможность автоматического определения пространственного положения узла, в случае выхода из строя отдельного узла есть возможность перестройки топологии сети.

Результаты

Полевые испытания установки проводились на опытном полигоне в подземном руднике Карнасурт (Ловозерский массив, Кольский полуостров). Проводилось измерения свободно выделяющихся газов (водорода и метана).

Всего 10 беспроводных узлов ML-SM-N, из которых 2 узла служили трансляторами, а на остальных были установлены датчики газа, расположены в 2 штреках – № 13 и № 11 (район активной разработки руды) (рис. 3).

В сегментах сети, которые мы использовали на руднике, располагалось 3-5 узлов. Это было сделано для того, чтобы провести испытание работы системы на разных рабочих частотах – 2,4 ГГц и 870 МГц. Кроме того, условия в 11-м штреке были более экстремальные, поскольку в нем очень высока обводненность горной выработки, что сильно усложняло передачу сигнала. Рабочая схема сети выглядит следующим образом: в зоне максимально близкой к зоне взрыва

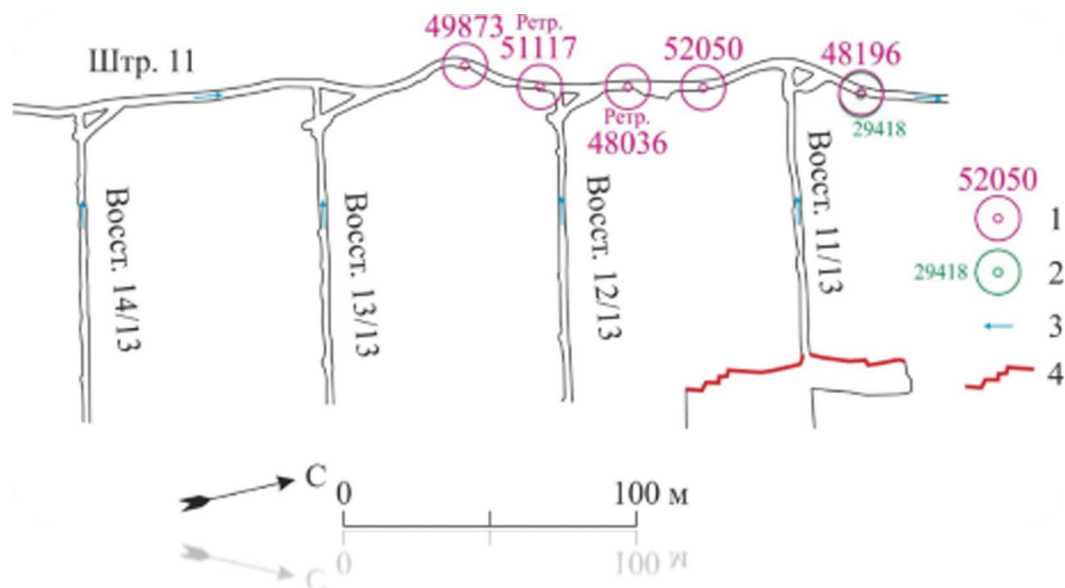


Рис. 3. Расположение узлов для длительного мониторинга в 11-м рудном штреке.

В условных обозначениях: 1 – положение узла и его «номер»; 2 – положение шлюза и его «номер»;

3 – направление потока воздуха; 4 – примерное положение фронта ведения взрывных работ

располагается сенсор. По кабелю он соединен с узлом сети. В узле установлена радиоаппаратура управления сенсором, система сбора данных и передачи информации на соседний узел и далее до центрального. Испытания проводили в двух штреках (рис. 4). Они существенно отличались по степени обводненности. В верхнем, 11-м штреке, она максимальна. Это создавало самые неблагоприятные условия для радиосвязи. При выбранной частоте радиосигнала 780 МГц расстояние устойчивой передачи составило только 50-100 м. Примерно в 1,5 раза можно увеличить дистанцию, применяя специализированные



Рис. 4. Узел сети с газовыми датчиками в шахте

антенны. 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 IT-сеть использовались возможности сотовой связи (рис. 5). Было разработано программное обеспечение чтения



Рис. 5. Шкаф с сотовым модемом. Расположен вблизи выхода из шахты. Используется для передачи данных от шлюза на сервер

получаемой информации (рис. 6). Далее информация автоматически передается в базу данных, где происходит первичная обработка данных. Для визуализации данных в пространстве и времени была разработана геоинформационная система. 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. Как было выяснено, газовая эмиссия значительно зависит состава пород. Проводились наземные испытания газовых датчиков на Хибинском массиве (рис. 7). В программном обеспечении предусмотрена система оповещения в экстренных

случаях, превышение допустимой концентрации газов – СМС-сообщения. Также разработана программа математической обработки временных рядов. Таким образом образуется единая информационная система получения, передачи, хранения, анализа и визуализации данных мониторинга. В данный момент разрабатывается веб-ГИС приложение.

На рис. 8 представлены типичные пики содержания водорода, связанные со взрывами. Взрывные работы проводят обычно один раз в сутки примерно в одно время. Но, например, 29.08 взрывы не проводились, и пик отсутствует. Снижение содержания водорода происходит достаточно быстро, что, в общем, свидетельствует об эффективной системе вентиляции в шахте. В то же время неожиданным фактом, который был установлен нашими

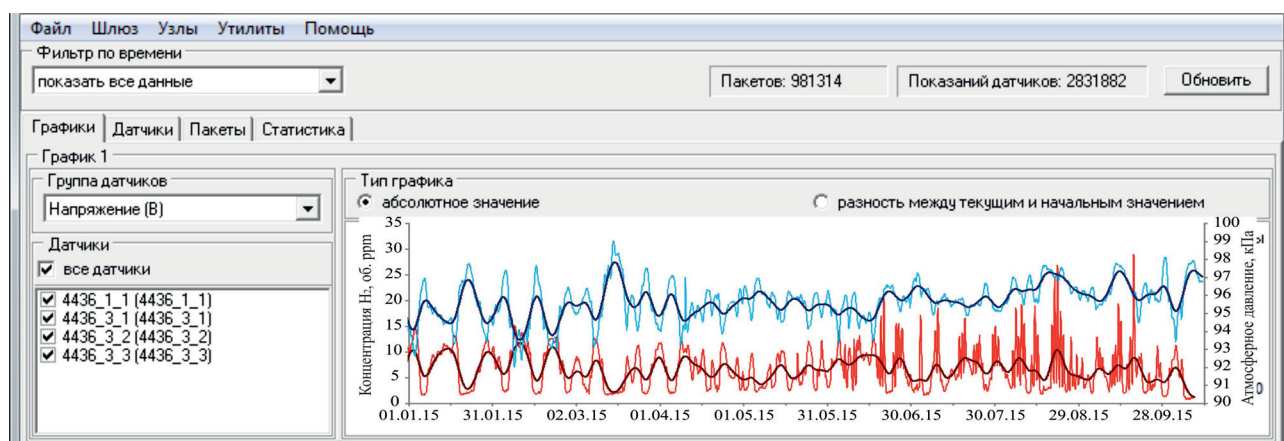


Рис. 6. Интерфейс программного обеспечения шлюза. Графики H_2 (красная линия) и атмосферного давления (синяя линия) показывают взаимообратную корреляцию

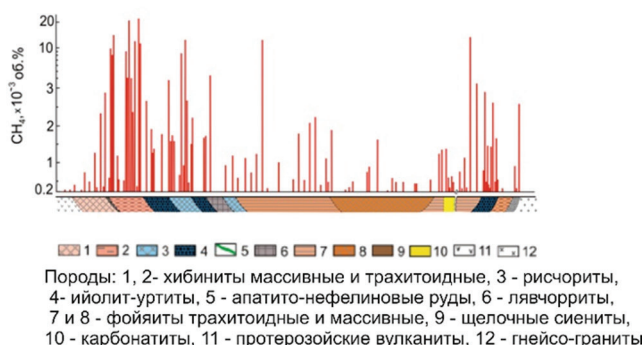
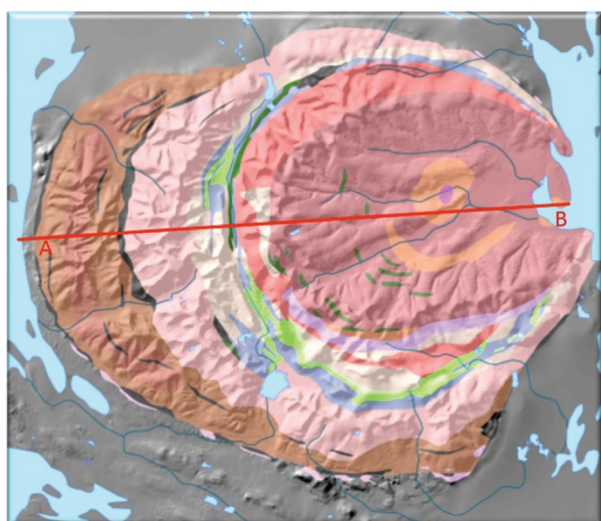


Рис. 7. 3D-модель Хибинского массива. Вариации средних содержаний метана по обобщенному субширотному разрезу Хибинского массива. Также на основе анализа трехмерной модели рельефа была выявлена существенная зависимость эманации газа от геоморфологии

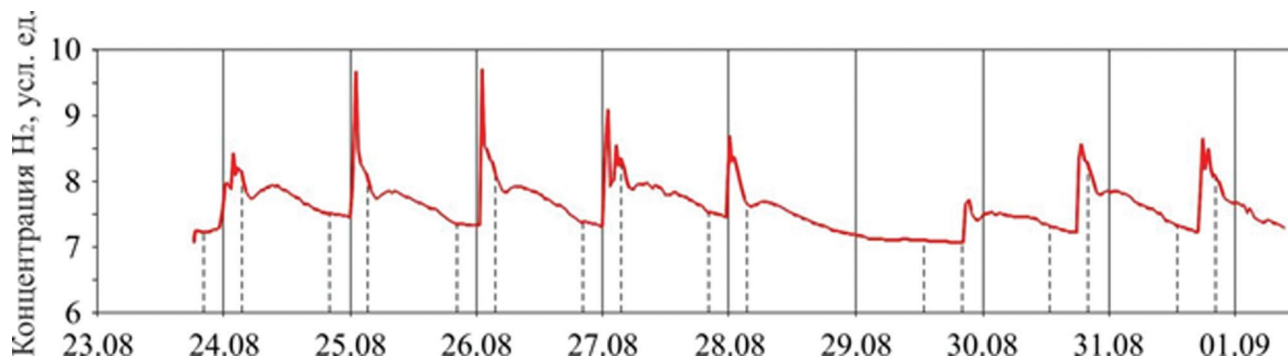


Рис. 8. Временной ряд мониторинга содержания водорода в атмосфере на одном из узлов 11-го штрека (содержания в $10^{-4}\%$). Пунктирными вертикальными линиями обозначены начало и конец смены взрывания

измерениями, оказалось очень значительная разница между фоновым и пиковым содержаниями водорода. Даже в нашем, ограниченном по времени интервале мониторинга, эта разница достигает 800, а обычно изменение составляет 12-40 раз.

То есть эти данные указывают на возможность появления критических опасных содержаний в атмосфере непосредственно после взрыва, а, следовательно, и возникновения взрывоопасной ситуации.

Благодаря возможностям разработанной аппаратуры, у нас впервые появляется возможность с достаточно высокой дискретностью в режиме реального времени наблюдать истечение газов из пород, вскрытых взрывом.

Анализ полученных данных еще предстоит сделать, но в целом работа показала хорошие перспективы использования WSN для геомониторинга газовых примесей в подземных выработках.

Отработанные технические и технологические решения и созданные опытные полигоны могут быть в дальнейшем использованы как опытно-методические площадки для развития данных технологий. Найденные решения можно использовать не только как инструмент для научных исследований, но и для обеспечения безопасности в горнорудной, нефтяной, газовой промышленности и др.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН I.32П «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации», а также при поддержке руководства ГОК «Карнасурт» и коллег из ГКНЦ РАН Нивина В.А., Пуха В.А.

Ключевые слова: мониторинг газовой эмиссии, беспроводные сенсорные сети, газовые сенсоры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nivin V.A. Free hydrogen-hydrocarbon gases from the Lovozero loperite deposit (Kola Peninsula, NW Russia) // *Applied Geochemistry*. – 2016. – № 74. – С. 44-55.
2. Баскаков С.С. Построение систем телеметрии на основе беспроводных сенсорных сетей // *Автоматизация в промышленности*. – 2012. – № 12. – С. 30-36.
3. Баскаков С.С., Читаев Д.Е. Оценка качества радиоканала в беспроводных сенсорных сетях // *Беспроводные технологии*. – 2013. – № 3. – С. 72-74.
4. Asavin A.M. New experience in atmospheric monitoring in Moscow city on the base of WSN technology // *Geophysical Research Abstracts, EGU2016 : Vol. 18. – Austria : Vienna : EGU General Assembly, 2016.*
5. 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.