

Геоэкологический мониторинг литосферной газовой эмиссии в Арктике на основе современных беспроводных технологий.

Асавин А.М.¹ Нивин В.А.², Чесалова Е.И.³, Литвинов А.⁴, Баскаков С.⁵ Линник

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН 119991 Косыгина ул. 19 Москва

² Геологический институт Кольского научного центра РАН 184209 Апатиты, ул. Ферсмана, 14 nivin@geoksc.apatity.ru

³ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН Моховая ул. 11 стр.11, Москва

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

⁵ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

Введение

Значительная часть России расположена в Арктическом регионе. Эти территории по-прежнему остаются малонаселенными, с низким уровнем инфраструктуры связи, энергетики и транспортных коммуникаций. Освоение этих районов приводит к необходимости разрабатывать принципиально новые технологии исследования и мониторинга природных и климатических обстановок в Арктике.

Одной из важных научно-технических проблем исследования арктических районов является организация сети постоянного наблюдения за состоянием гидросферы атмосферы и литосферы в этих районах. Актуальность этого велика, поскольку наблюдаемые, в последнее время, изменения состава и других параметров атмосферы, происходящие за счет как природных, так и антропогенных факторов, оказывают разнообразное, преимущественно неблагоприятное воздействие на экосистемы.

Многие из таких изменений наиболее заметны в высоких широтах Северного полушария. Так, именно в атмосфере Арктики зарегистрирован планетарный максимум основных парниковых газов – диоксида углерода и метана [Шахова, 2010; Сергиенко и др., 2011 и др.]. Последние оценки вклада CH_4 в современный потенциал глобального потепления показывают, что суммарный радиационный форсинг от 1 кг метана превышает аналогичную величину для диоксида углерода примерно в 30-35 раз. Также известно, что максимум атмосферных концентраций CH_4 приходится на регион Арктики/Субарктики.

Рост концентрации парниковых газов в атмосфере приводит к изменению энергетического баланса климатической системы и, как следствие, к глобальному изменению климата Земли. Арктический регион оказался наиболее чувствительным к глобальным изменениям климата, прежде всего, к потеплению [Юдахин и др. 2010; Кароль & Киселев 2004; Yurganov et al., 2014]. Последнее все чаще связывается не только с более быстрым накоплением здесь парниковых газов, образующихся, прежде всего, вследствие деградации наземной и подводной мерзлоты, но и с увеличением концентрации, например, тропосферного озона, а также других загрязняющих компонентов, источниками которых являются выбросы промышленных предприятий, транспорт, газовые факелы, электростанции, лесные пожары и тому подобное. В Арктике/Субарктике распространение таких загрязнителей происходит относительно быстро и на большие расстояния [Гинзбург & Виноградова, 2009].

Имеющиеся в настоящее время станции постоянного наблюдения за атмосферой (всего 5 постоянно действующих в России в настоящее время, станций Росгидромета) [Обзор..., 2014; Кузнецов 2014]. Проект развития сети наблюдений «Развитие региональной системы мониторинга парниковых газов, предназначенной для анализа распределения и многолетней изменчивости их концентрации на территории Западной

Сибири» включает 8 стационарных станций и одновременное измерение состава газов с аэро-лабораторий [Аршинов и др., 2009; Быкова 2014].

На Арктических морях и проводятся также ряд измерений в научно исследовательских рейсах.

Поступление метана из почвы обусловлено активностью метатрофных микроорганизмов, изменяющейся в зависимости от состава и термического режима почвы. Однако поступление литосферных газов, связанное с геологическими процессами, остается практически неисследованным [Сывороткин, 2002; Нивин, 2009;].

Оценивая в целом полноту исследования эмиссии углеводородных газов их почв и литосферы большинство исследователей рассматривают имеющиеся данные как совершенно недостаточные.

Например в работе [Аршинов и др., 2009] сказано – «Россия обладает огромными массивами ненарушенных или слабо нарушенных экосистем которые занимают 65% территории страны. При этом она представляет собой «белое пятно в научных исследованиях, так как данных измерений парниковых газов на ее территории практически нет». Из этого следует, что необходимо активно развивать технологии газового мониторинга в Арктических районах.

Система наблюдений в Арктике должна: (а) быть автономной и мало энергоемкой; (б) иметь возможность долговременного мониторинга на значительных по размеру наблюдательных полигонах или профилях; (в) отслеживать одновременно несколько параметров с достаточно высокой частотой измерений; (г) обеспечивать дистанционной управление аппаратурой сети с возможностью удаленного получения данных и изменения параметров измерений.

Автоматизация систем мониторинга в результате появления новых разработок в области микроэлектроники и передачи данных (WSN - беспроводные сенсорные сети) позволяет подойти к решению этой задачи. В данной работе на примере создания аппаратуры для измерения эмиссии литосферных газов и создания Хибинского опытно-методического полигона мы попытались рассмотреть перспективы и новые технологии мониторинга с помощью беспроводных сетей наблюдения.

Хибинская и Ловозерская природно-техногенные системы (ПТС) на Кольском полуострове как потенциальный полигон для апробации сети газового экомониторинга

Основой хозяйственной деятельности здесь, как и во многих других районах российской Арктики, является добыча и обогащение минерального сырья: апатито-нефелиновых руд в Хибинской ПТС и редкометальных - в Ловозерской. Уникальные месторождения этих полезных ископаемых связаны с одноименными горными массивами (крупнейшими в мире магматическими комплексами щелочных пород). Рассматриваемые ПТС расположены в центральной части Кольского полуострова.

Кроме горных массивов они включают в себя окружающие таежно-тундровые равнины, крупные озера и речную сеть, карьеры и подземные рудники, обогатительные фабрики, отвалы вскрышных пород и хвостохранилища, предприятия энергоснабжения, транспортные коммуникации, два города, крупные поселки городского типа и небольшие поселения, места захоронения бытовых отходов. Общая площадь района около 90 x 60 км (Рис.1).

Одной из примечательных особенностей Хибинского и Ловозерского щелочных массивов является насыщенность их необычными для магматических комплексов водородно-углеводородными газами (ВУВГ) разных морфологических типов (форм нахождения). Основными морфотипами являются газы закрытых пор (микровключенные, окклюдированные – ОГ), находящиеся главным образом в вакуолях флюидных микровключений в минералах, и свободно (спонтанно, самопроизвольно) выделяющиеся газы (СГ), которые обычно заполняют системы в той или иной степени связанных трещин

(чаще микротрещин) и другие полости в породах [Петерсилье, 1964; Икорский и др., 1992 и др.]. ОГ могут экстрагироваться лишь при тонком измельчении пород или нагревании их до высоких температур, а СГ выделяются из пород при выходе их скоплений или газоподводящих зон на дневную поверхность и при вскрытии, например, шпуром, скважиной или горной выработкой. В некоторых отношениях переходной формой нахождения между двумя основными являются диффузно-рассеянные газы, также отчасти способные к самопроизвольному выделению [Нивин, 2009].

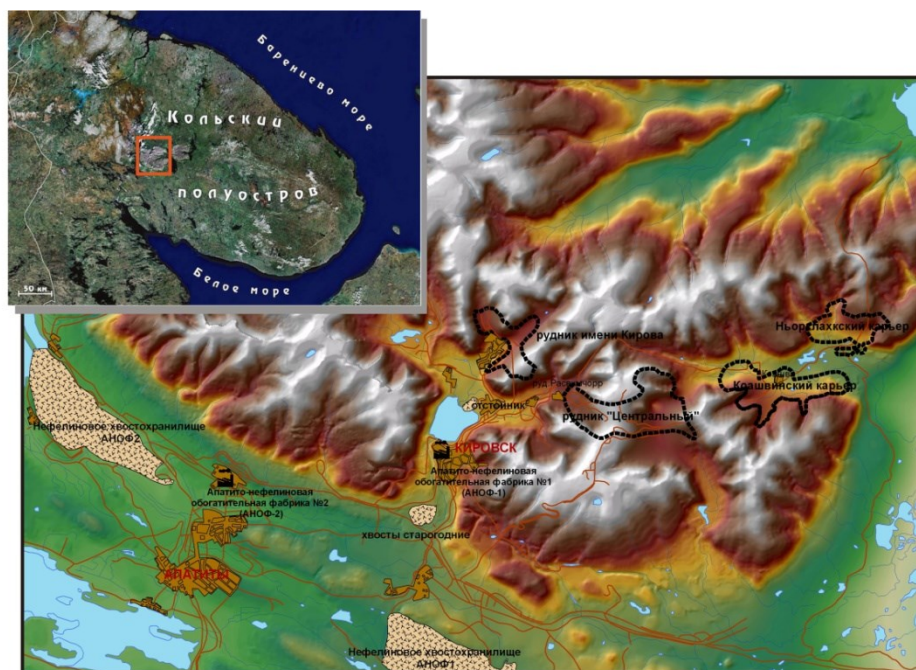


Рис.1 Цифровая 3D модель Хибинской природно-техногенной системы (часть разработанного нами ГИС проекта).

Главным компонентом газовой фазы является метан, подчиненными – молекулярный водород (иногда преобладает) и этан. В качестве микрокомпонентов присутствуют более тяжелые гомологи метана (до пентанов включительно), непредельные углеводороды и гелий. Сравнительно редко и в незначительных количествах обнаруживаются оксид и диоксид углерода. Окклюдируемые газы представляют преимущественно лишь научный (геохимический) интерес. Напротив, изучение свободных газовывделений всегда имело и практическую направленность. В первую очередь потому, что являясь горючими и взрывоопасными, компоненты СГ могут накапливаться до опасных концентраций в атмосфере подземных рудников, обрабатывающих Хибинские апатитовые и Ловозерские редкометалльные месторождения, создавая тем самым серьезную угрозу нарушения технологического цикла ведения горных работ, а также здоровью и жизни горняков [Онохин, 1959; Икорский и Нивин, 1984; Нивин, 1991; и др.]. Поэтому газоносность (условия локализации, состав, содержание в породах, характер и масштабы выделения газов) стала неотъемлемой частью горно-геологической характеристики этих месторождений.

Выделения водородно-углеводородных газов со дна Сейдозера, одного из самых красивых горных озер страны, расположенного в центре Ловозерского массива, могут быть причиной случающейся здесь массовой гибели рыбы, включая уникальную популяцию сига [Нивин и Аведисян, 2007]. Имеющиеся оценки [Хитаров и др., 1979; Войтов, 2000; Нивин, 2013] позволяют также предполагать, что эманации из щелочных массивов могут вносить свой, очевидно, заслуживающий внимания и дальнейшего изучения, вклад в баланс CH_4 в атмосфере высоких широт.

В последнее десятилетие заметно возрос интерес к эмиссии литосферного молекулярного водорода, обусловленный, в том числе, необходимостью понять возможность и степень его воздействия на озоновый слой. Флуктуации общего содержания озона в атмосфере считаются главной причиной погодных (и климатических) аномалий [Сывороткин, 2002; Сывороткин 2013 и др.]. Пока что роль глубинного H_2 в образовании так называемых «озоновых дыр» оценивается по-разному – от определяющей [Сывороткин, 2002] до практически никакой [Адушкин и др., 2006]. В ходе газометрических наблюдений многократно выявлялись соответствия повышения интенсивности эманаций водорода из Хибинского и Ловозерского массивов и локализованных отрицательных аномалий стратосферного озона в регионе. Однако говорить об устойчивости выявленной зависимости пока преждевременно. Необходимы дальнейшие исследования в этом направлении с учетом различных факторов, влияющих на эмиссию литосферных газов, перенос и химические реакции газовых компонентов в атмосфере и на содержания озона.

Особенности вариаций газогеохимического поля рассматриваются также в качестве потенциальных предвестников имеющих место при разработке Хибинских и Ловозерских месторождений [Козырев, 2001; Техногенная сейсмичность..., 2004; Козырев и др., 2002; Ловчиков, 2004; Техногенная сейсмичность..., 2004; Мельников 2002] опасных динамических проявлений горного давления - горных и горно-тектонических ударов и мелкофокусных (природно)-техногенных землетрясений [Нивин, 1989; Nivin et al, 2001; Нивин и др., 2009].

Для свободных газов в щелочных массивах характерны широкие пространственно-временные вариации состава и интенсивности выделения [Икорский и др., 1992; Нивин, 2013].

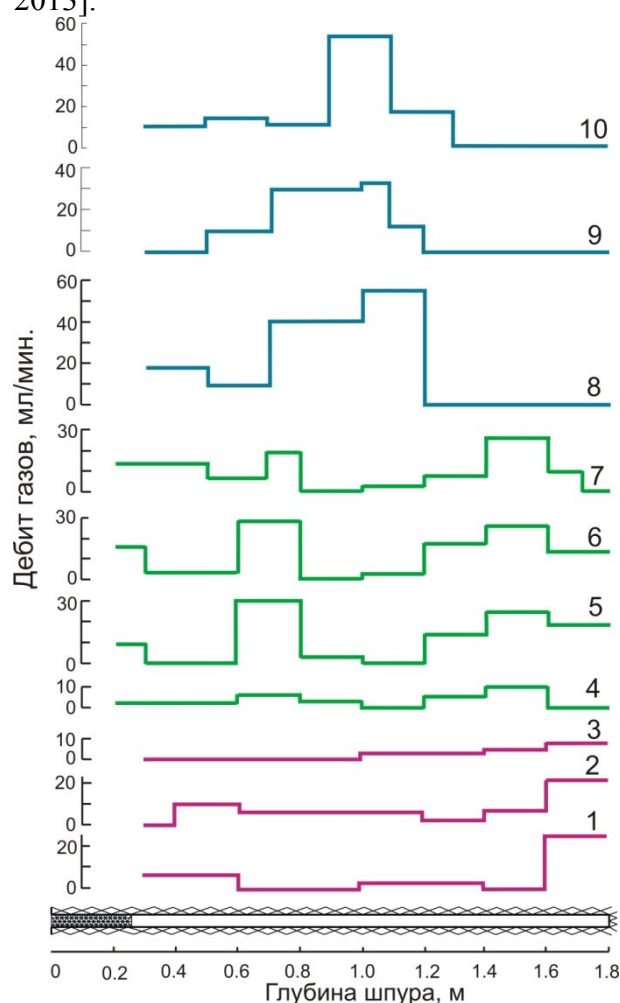


Рис. 2. Пространственно-временные вариации интенсивности выделения СГ в загерметизированные шпуры (Карнасуртский рудник, Ловозерский массив)

Измерения проводились через 16 (1), 77 (2), 169 (3), 15 (4), 68 (5), 69 (6), 161 (7), 8 (8), 63 (9) и 154 (10) дня после бурения.

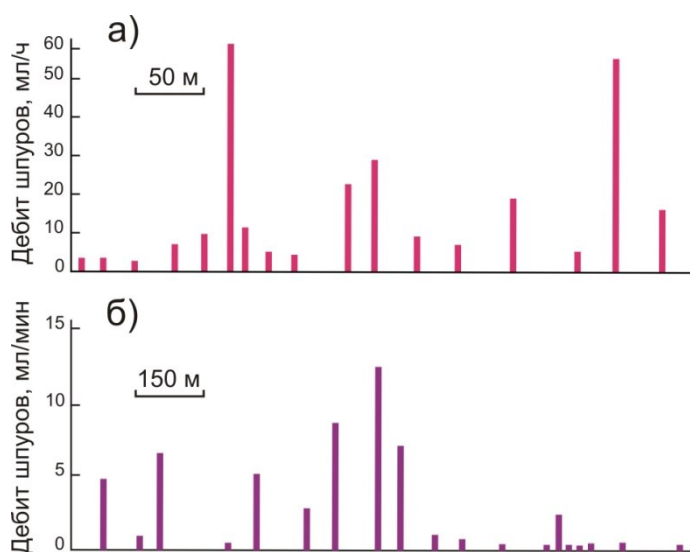


Рис. 3. Распределение СГ в урти́тах месторождения Апатитовый цирк в Хибинах (а) и фойи́тах Ловозерского массива (б)

Разномасштабную неравномерность локализации СГ можно проиллюстрировать рисунками 2-4. В отличие от окклюдированных газов, для которых установлены структурно-геологические, петрологические и минералогические факторы распределения, для газов свободных выделений намечаются лишь самые общие особенности локализации. Так, в Хибинах все известные значительные проявления СГ сосредоточены в пределах Центральной кольцевой структуры массива. Приповерхностная профильная газовая съемка показала, что площадям развития пород этой же структуры (рудного комплекса) соответствуют повышенные концентрации углеводородных газов в подпочвенном воздухе (рис. 4). Максимальные же содержания УВГ в подпочвенной атмосфере выявлены в западном секторе комплекса трахитоидных хибинитов. В Ловозерском массиве предполагается более высокая газоотдача дифференцированного комплекса по сравнению с эвдиалитоносным. Однако установленная временная нестабильность газовыделения (рис. 2 и 5) не позволяет считать устойчивыми даже эти особенности пространственной локализации СГ. Наблюдениями за эмиссией молекулярного водорода в обоих массивах выявлена сложная, нестационарная полиритмичность динамики газовыделения [Тимашев и др., 2011]. Нестабильность потока выделявшихся газов во времени определяется, по-видимому, многими факторами.

Важнейшими из них являются изменения тектонофизического состояния и сейсмическая активность массивов, а также космические (явно выраженные околосуточные, суточные, полусуточные и шестичасовые ритмы). Последние связываются с прохождением лунно-солнечных приливных волн). Происхождение свободных газов менее определено по сравнению с окклюдированными газами, образовавшихся преимущественно на постмагматических стадиях формирования щелочных комплексов.

Постоянная геодинамическая и сейсмическая активность Хибинского и Ловозерского массивов, обуславливает вариации состава и динамики выделения СГ, по-видимому, представляющих собой смесь в варьирующих пропорциях газов: (а) оставшихся в микротрещинах при консолидации массивов захвата флюидными включениями и потерь в процессе дегазации; (б) просачивающиеся из глубоких частей массивов или остаточных промежуточных магматических очагов, где они до настоящего времени могут генерироваться по реакциям типа Фишера-Тропша; (в) образующиеся за счет механохимических реакций и частичного высвобождения ОГ в условиях постоянно изменяющегося напряженно-деформированного состояния породного массива [Войтов и

др., 1990, Войтов и др. 1992; Нивин, 2006; Нивин, 2013]. Наши измерения и исследования показали большие колебания (на порядки величин) как концентраций газов так и значений потока газовой эманации.

Таким образом, в пределах рассматриваемых ПТС источники опасных и вредных газовых загрязнителей атмосферы могут быть антропогенными и природными. Из последних наиболее мощными будут водородно-углеводородные эманации Хибинского и Ловозерского горных массивов.

Менее интенсивными ожидаются выделения CO_2 и CH_4 на равнинных заболоченных территориях. В болотных экосистемах на территории ПТС можно ожидать эмиссию углеродсодержащих парниковых газов, хотя, видимо, меньшую, чем, например, в ряде районов Арктического побережья и Западной Сибири [Глаголев и др. 2010, Анисимов и др. 2005, Степаненко и др. 2011].

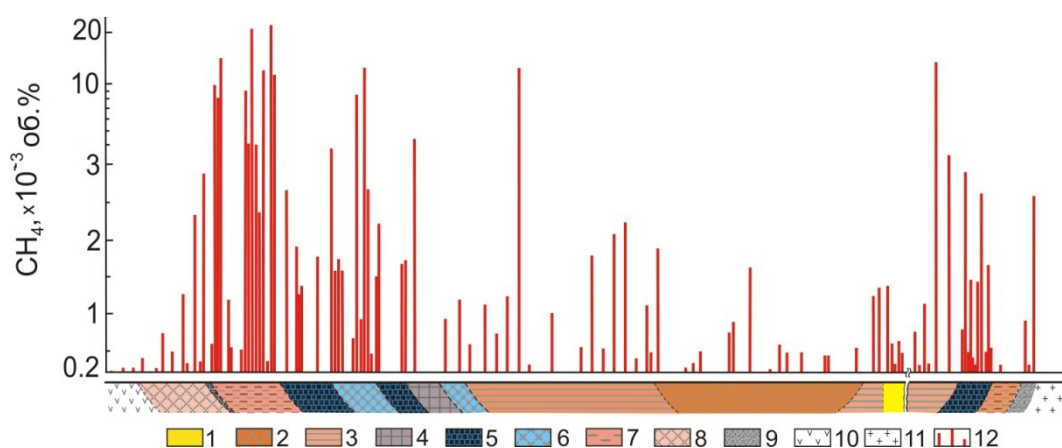


Рис. 4. Концентрации метана в подпочвенном воздухе по объединенному профилю через Хибинский массив

1 – карбонатиты, 2 и 3 – хибиниты массивные и трахитоидные, 4 - ийолит-уртиты, 5 – рисчорриты, 6 – лязвочорриты, 7 и 8 – фойяиты трахитоидные и массивные, 9 – фениты по гранито-гнейсам, 10 - протерозойские вулканиты, 11 – гнейсо-граниты, 12 – содержания CH_4

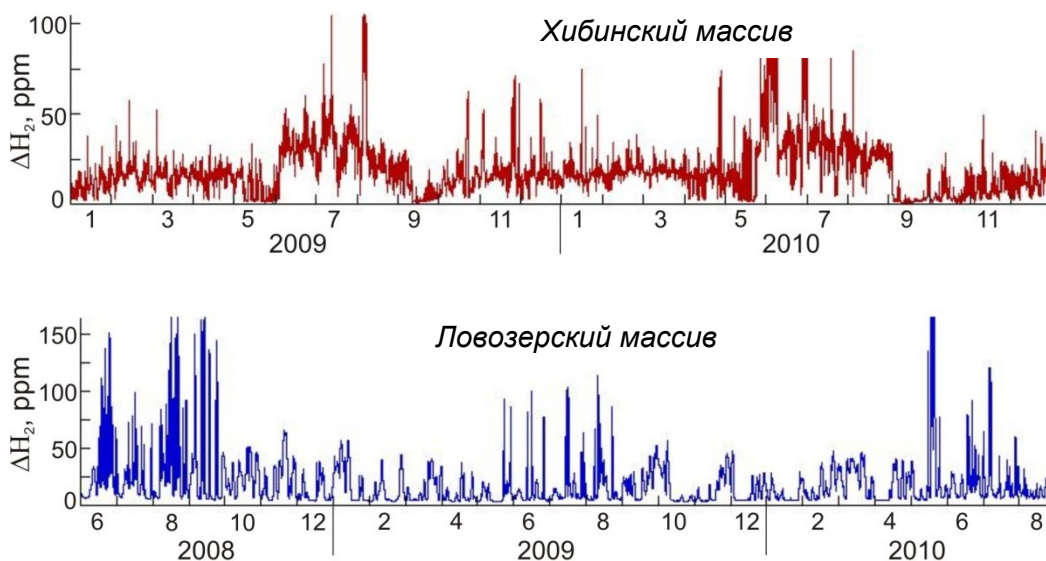


Рис. 5. Динамика хода молекулярного водорода в щелочных массивах (горизонтальная ось – год и месяц)

Старые методики измерений, используемые и нами, и другими исследователями методы газометрических наблюдений, позволили решить многие вопросы, связанные с эмиссией литосферных газов.

Определен состав газовой фазы, показана нестабильность газовыделения во времени, выявлены некоторые особенности пространственной локализации и динамики выделения отдельных компонентов, намечены факторы, обуславливающие эти особенности.

Однако, имеются существенные принципиальные ограничения этих методик. Это, прежде всего, эпизодичность измерений и короткий период наблюдений. обусловленный коротким полевым сезоном экспедиционных работ в Арктике. Во вторых существующие методы не позволяют одновременно отслеживать вариации более одного-двух газовых компонентов и при этом одновременно измерять другие параметры среды.

Как показали наши работы по Хибинскому ПТС вариабельность изменений потока газов достаточно высока (2-3 порядка величин) и зависит от различных характеристик природных процессов (петрографический состав коренного субстрата, состав растительного покрова, солнечно-лунная цикличность, солнечная активность, температура, влажность, наличие осадков и т.п. факторы). Возможно, необходимо учитывать микро сейсмичность и напряженное состояние горных пород.

Поэтому для получения достоверных обобщенных характеристик или вычисления количественных зависимостей, нам надо получить данные по долговременным наблюдениям естественной газовой эманации с учетом многопараметрических характеристик среды. Это сложная научная и технологическая задача.

Важно проводить одновременные измерения во многих пунктах и на больших территориях с разными ландшафтно-экологическими обстановками. Это позволит исследовать пространственно-временные вариации эмиссии газов в комплексе, установить устойчивые закономерности этих вариаций, оперативно анализировать собранные данные и делать экологические прогнозы, повысит надежность оценки установленных связей газовыделения с характеристиками среды.

Насколько нам известно, подобных систем экологического мониторинга вообще и газового в частности, нигде в мире еще не создано. Однако современные технологии в микроэлектронике и информатике позволяют предложить альтернативные методы мониторинга, которые способны решить поставленную задачу. Одной из наиболее перспективных технологий для решения поставленных задач может быть технология беспроводных сенсорных сетей.

Беспроводные сенсорные сети (WSN)

WSN (wireless sensor network) представляет собой распределенную, самоорганизующуюся, устойчивую к отказам отдельных элементов, систему миниатюрных вычислительных устройств с автономными источниками питания. Узлы такой системы транслируют сообщения друг через друга, обеспечивая значительную площадь покрытия сети при малой мощности передатчика. Наиболее популярными прикладными областями для технологии являются мониторинг объектов, процессов и систем. Обмен информацией между узлами системы происходит по беспроводным каналам связи в радиодиапазонах 2.4 ГГц, 870-930 МГц по стандарту IEEE 802.15.4. Эти технологии были разработаны примерно в 2005-2007 годах и совершили революцию в области передачи данных и управления внешними устройствами в различных областях (от медицины до строительства).

Подробности технического обеспечения построения WSN достаточно детально изложены, в работах [Akyldiz et al.,2002; Culler et al.,2004; Hart & Martinez 2006; Benson et al.,2010; Борисов 2013 и др.]. Существует также ряд специализированных учебников «Industrial Wireless Sensor Networks Application, Protocol and Standards», «Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering», «In Autonomous Sensor Networks. Collective Sensing Strategies for Analytical Purposes» [Gungor

& Hancke 2013; Zheng et al.,2012; Diamond et al.,2013; Cayirci 2013;]. Выходят серии периодических журналов (Wireless Sensor Network; International Journal of Sensor Networks IJSNet; Ad Hoc Network; IEEE Sensors; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking; Датчики и системы; Беспроводные Технологии). Основными центрами которые разрабатывают эти технологии в России являются - Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Томский Государственный Университет, Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова. В данной работе мы лишь кратко остановимся на технических возможностях WSN, их преимуществах для целей экологического мониторинга.

В общем случае сеть состоит из рабочих и управляющих узлов – нодов. К рабочим нодам подключается сенсорное оборудование (датчики) для определения параметров окружающей среды, а через управляющие ноды данные собираются и передаются на шлюз (базовую станцию), с которого данные далее поступают на сервер (персональный компьютер). С помощью программного обеспечения сервера производится первоначальная настройка сети (например, установка периода опроса датчиков), диагностика ее функционирования и обработка собранной сетью телеметрической информации.

Сенсорные сети имеют ряд ключевых отличий от других типов сетей передачи информации:

- ограниченные аппаратные ресурсы узлов (вычислительная мощность, объем памяти, емкость источника питания);
- радиоканалы с низкой надежностью, малой пропускной способностью и дальностью связи;
- большие масштабы сети (до нескольких десятков тысяч устройств);
- необходимость обеспечения длительного срока службы автономных источников питания узлов;
- самоорганизации сети и ее отказоустойчивости.

В результате потребовалась разработка принципиально новых алгоритмов и протоколов сетевого взаимодействия узлов WSN, что явилось предметом многих научных исследований последних лет.

В настоящее время наиболее известной и распространенной технологией для построения БСС является стандарт ZigBee, но его практическое использование в данном проекте нецелесообразно из-за сложностей в развертывании полноценных mesh-сетей, в которых все узлы являются сенсорными и маршрутизаторами (выполняют опрос датчиков и ретрансляцию сообщений соседних узлов), но при этом имеют низкое среднее энергопотребление за счет автоматического перехода в «спящий» режим.

Основные преимущества WSN технологий

Основным свойством беспроводных сенсорных сетей является их автономность и низкое среднее энергопотребление. Это достигается за счет оптимизации переключения между активными режимами (опрос датчиков и обработка результатов измерений, передача и прием пакетов по радиоканалу и т.д.) и режимом «сна», в котором приемопередатчик выключен, электропитание на датчиках отсутствует, а управляющий микроконтроллер находится в режиме пониженного потребления (гибернация). В результате срок службы автономных источников питания узла может достигать нескольких лет, что определяется влиянием следующих факторов: особенности (энергоэффективность) стека сетевых протоколов, емкость элементов питания (как правило, используются литиевые или щелочные батарей типоразмера AA), число и потребляемая мощность датчиков, период их опроса, положение узла в топологии сети (затраты энергии на ретрансляцию сообщений могут быть значительно больше, чем затраты на передачу собственных данных), качество

связи (при низкой надежности беспроводного соединения увеличиваются энергозатраты из-за необходимости повторных передач пакетов) и т.д.

Например, при мощности передатчика MaxStream XBee Ser2 2 мВт энергопотребление при передаче сигнала составляет - 2.1-3.6 V ток 35 ма. А в режиме сна ток падает до < 1 мкА. Снижая время передачи пакетов с данными и их размер, можно увеличить время непрерывной работы сети до года.

В WSN применяются маломощные приемопередатчики, поэтому дальность радиосвязи между соседними узлами может быть от нескольких метров до нескольких километров в зависимости от параметров приемопередатчиков (частота, выходная мощность передатчика, чувствительность приемника и т.п.) и условий распространения радиоволн (открытое пространство, внутри помещений, в лесном массиве и т.д.). При сложном рельефе для большей надежности работы сети рекомендуется проводить дублирование узлов для передачи данных [Talukder et al.,2009; Evans et al.,2012]. Поскольку, как правило, узлы расположены относительно друг друга в произвольном порядке, обычно используют всенаправленные антенны, но в некоторых приложениях допустимо использовать направленные антенны для увеличения дальности радиосвязи на 1-1.5 порядка величин [Kruesi et al.,2009; Жиганов и др. 2007]. Кроме того, из-за вариаций климатических параметров и эффектов замирания в процессе функционирования сети могут наблюдаться значительные колебания значений радиуса действия беспроводной связи и ее надежности, а также имеет место асимметрия качества связи, что существенно усложняет проектирование БСС для конкретных условий эксплуатации.

На сегодня, опыт построения таких радиосетей в горной местности весьма ограничен. Например, проект мониторинга снегового покрова в Альпах [Evans et al.,2012] (Рис.6). Для нашего полигона также характерны большие (до 100-200м) перепады высот и сложный рельеф со множеством закрытых ледниковых цирков и долин.

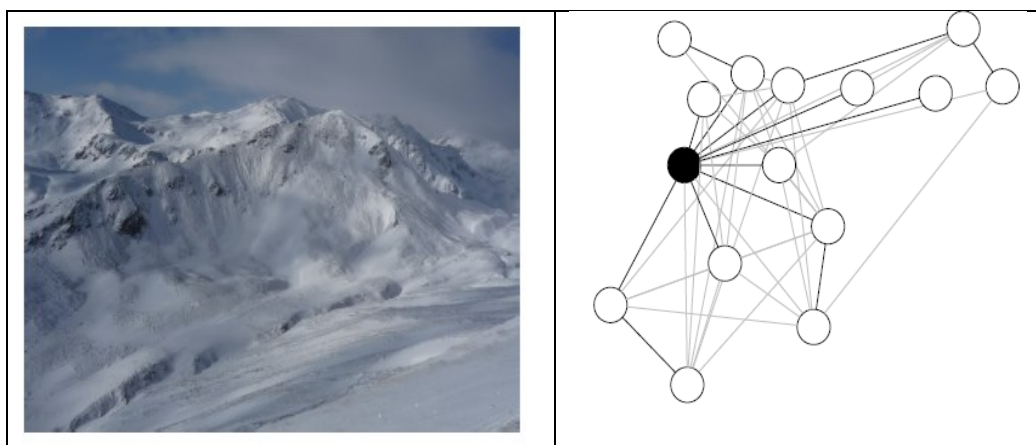


Рисунок 6. Из Работы [Evans et al.,2012] полигон в Альпах (слева) где на участке расположены 18 узлов сети (справа их пространственное расположение). На полигоне сеть работала в автономном режиме в течении трех месяцев.

На рабочем узле обычно располагается несколько датчиков. Стандартно измеряются температура, давление, и относительная влажность для мониторинга параметров окружающей среды. Далее, в зависимости от прикладной задачи сети, подключаются специализированные сенсоры - измерение содержаний газовой примеси в атмосфере, освещенность, сейсмичность, задымленность и т.п. Возможности современной аппаратуры узла WSN очень широки. Можно подключать до 16 устройств или же их меньшее количество, но с большим числом измеряемых параметров. Это открывает новые возможности по сравнению со старыми методами наблюдения, позволяя более полно исследовать природные объекты через взаимосвязи их различных характеристик. Можно также увеличить и количество измерений, записываемых в постоянную память в каждом узле. При наращивании памяти до нескольких гигабайт вместо обычных 100-200 записей

(данные за несколько дней работы), для снижения общего объема сетевого трафика с целью минимизации энергопотребления, а также на случай кратковременной потери связи с соседними узлами.

Важным преимуществом WSN является технология автоматической оценки пространственного, взаимного расположения узлов. Это позволяет легко встраивать получаемый поток данных в ГИС-проекты, в том числе в режиме реального времени. Пространственная привязка сети к цифровой модели местности, геологическим и другим картам позволяет получить зависимости наблюдаемой эмиссии газов от различных природных параметров, перейти к прогнозному моделированию. С этой целью в рамках проекта мы разрабатываем трехмерную цифровую модель местности Хибинского ПТС. В настоящее время технологии взаимодействия WSN с различными проектами ГИС активно развиваются на основе ИНТЕРНЕТ коммуникаций – ГИС-Web технологии, удаленные Web-сенсоры [Yu et al.,2008; Nittel, 2009], технологии Умный-Дом, Интернет-Вещи - устройства которые комбинируют облачные технологии и сенсоры окружающей среды [Kassal et al., 2013].

В конце 2014г. благодаря финансовой поддержке программы Президиума РАН № 44 нами был организован проект по развертыванию WSN сети мониторинга газовой эмиссии на Хибинской ПТС. Первые результаты работы позволяют рассчитывать на успех проекта.

Используемое в проекте оборудование.

Для организации беспроводной сети нами была использована система мониторинга ML-SM, состоящая из беспроводных узлов ML-SM-N, модулей сопряжения ML-SM-Sx, беспроводного шлюза ML-SM-G и сервера со специализированным программным обеспечением.

Беспроводной узел ML-SM-N (рис. 7) размещен в пластиковом корпусе со степенью защиты IP66, в том же корпусе располагаются платы модулей сопряжения ML-SM-Sx и элементы автономного электропитания. Универсальная модульная конструкция беспроводного узла ML-SM-N позволяет установить в каждый узел до 4 мезонинных модулей сопряжения с различными типами датчиков в любом порядке и в произвольных комбинациях. Модули сопряжения ML-SM-Sx предназначены для подключения к беспроводному узлу ML-SM-N внешних датчиков (число измерительных каналов от 1 до 16 в зависимости от типа модуля и вида датчиков) и выполняют подачу электропитания на датчики, а также согласование их выходных сигналов с измерительной системой беспроводного узла ML-SM-N. 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.



Рисунок. 7. Беспроводной типовой модуль ML-SM-N (справа) и устройство в сборе (центр), слева модуль сопряжения ML-SM-SVA

Для подключения газовых датчиков использовался модуль сопряжения ML-SM-SVA (рис. 7 справа), выходным сигналом которых является напряжение в диапазоне от -10 до 10 В или ток в диапазоне от 0 до 20 мА.

Основным источником питания беспроводного узла являются встроенные Li-SOCL2-батареи типоразмера AA с номинальной емкостью 2400 мАч в количестве 4 шт., но в случае необходимости может использоваться внешний источник постоянного напряжения (например, блок питания), а встроенные элементы питания узла будут резервными.

По умолчанию узел имеет всенаправленную антенну, размещенную внутри корпуса для обеспечения вандалоустойчивости, но возможно исполнение изделия с разъемом для подключения внешней антенны, что будет использоваться в дальнейшем при испытаниях целесообразности применения узконаправленных антенн.

Совокупность беспроводных узлов ML-SM-N с подключенными к ним через модули сопряжения ML-SM-Sx внешними датчиками образует сенсорную сеть, основанную на маломощных радиочастотных приемопередатчиках стандарта IEEE 802.15.4 нелицензируемого диапазона частот 2400-2483,5 МГц и стеке сетевых протоколов MeshLogic. На первом этапе использовались всенаправленные антенны, но, благодаря способности узлов в случае необходимости ретранслировать пакеты для их доставки шлюзу, удалось и в этом варианте создать распределенную систему со значительной площадью покрытия. При этом беспроводные узлы автоматически выполняли поиск маршрутов как при первоначальном развертывании сети, так и в случае перемещения отдельных узлов, их выключения для технического обслуживания или выхода из строя. Такая организация сети обеспечивает гибкость при развертывании системы телеметрии на объекте и повышенную надежность системы сбора информации.

Таблица 1. Основные технические характеристики модуля

Параметр	Значение
Тип радиоканала	IEEE 802.15.4
Диапазон частот	2400...2483,5 МГц
Выходная мощность передатчика	до 1 мВт (0 дБм)
Чувствительность приемника	-95 дБм
Напряжение питания	от 2,7 до 3,6 В
Ток потребления в режиме передачи	21 мА/24 мА/3,7 мА/9 мкА
Интерфейс управления	UART (LVCMOS)
Скорость интерфейса UART	от 9600 до 921600 бит/с
Габаритные размеры	25,4X19,05X2,7 мм
Температурный диапазон	-40...85°C
Элементы питания модуля	Li/SOCL2-батарей (4 шт. типоразмера AA), 2400Ач

Заметим, что далеко не все представленные на рынке решения позволяют создавать полноценные mesh-сети, в которых все узлы могут выполнять ретрансляцию при работе от автономных элементов питания. Отличие MeshLogic от других продуктов заключается в собственном стеке сетевых протоколов [Баскаков 2008], 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.

В соответствии с заданным в настройках системы периодом (для задачи газового мониторинга был выбран период равный 1 часу) беспроводные узлы ML-SM-N автоматически выполняют нормализацию и аналого-цифровое преобразование сигналов с подключенных к нему внешних датчиков. Они проводят первичную обработку

результатов измерения и их передачу по радиоканалу шлюзу ML-SM-G. Полученные от беспроводных узлов ML-SM-N данные шлюз ML-SM-G сохраняет в энергонезависимой памяти, отмечая время их поступления и другую служебную информацию для однозначного последующего восстановления собранных данных из архива. Таким образом, шлюз выполняет функцию автономного регистратора показаний, поступающих от распределенных датчиков. Далее с помощью специального программного обеспечения информация из архива шлюза может быть загружена на сервер или передана какой-либо системе более высокого уровня для отображения и последующей обработки. При этом передача информации от шлюза до сервера может осуществляться по проводным (USB или RS-485) или беспроводным (сотовая связь) каналам связи.

Антенна может быть подсоединена к шлюзу напрямую или через кабель. Электропитание беспроводного шлюза ML-SM-G может быть обеспечено от шины USB (при непосредственном подключении к серверу), от внешнего источника питания (например, аккумулятора с номинальным напряжением 12 В), а также от внешнего источника питания, подключенному к гальванически изолированному входу. При этом все источники электропитания могут быть подключены к шлюзу одновременно, а переключение между ними выполняется автоматически по максимальному напряжению, что позволяет обеспечить резервирование системы электропитания шлюза ML-SM-G для повышения надежности системы мониторинга. Конструкция и исполнение беспроводных узлов, модулей сопряжения и шлюзов обеспечивает их работоспособность в широком диапазоне климатических параметров с рабочим диапазоном температур от -40 до +85 °С.

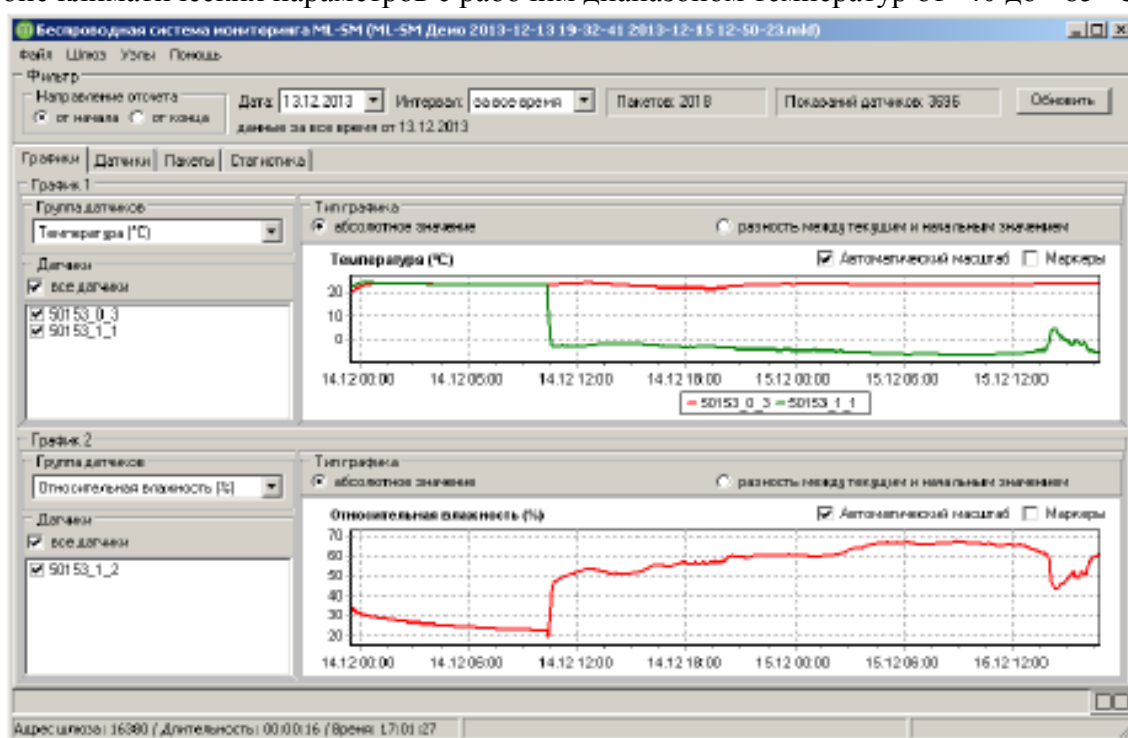


Рисунок 8. Экран пользовательского интерфейса работы программного обеспечения сервера. Отображение результатов измерений в виде графиков

Программное обеспечение сервера совместимо с 32- и 64-разрядными операционными системами Microsoft Windows XP/Vista/7/8 и предназначено для выполнения следующих функций:

- настройка параметров беспроводной сети сбора данных (в частности, период опроса датчиков);
- считывание накопленной информации из архива беспроводного шлюза;
- преобразование телеметрической информации (декодирование, масштабирование и т.д.);

- отображение результатов измерений в виде графиков и таблиц;
- отображение служебной диагностической информации;
- сохранение собранных данных в виде файлов для архивирования и последующей обработки;
- загрузка ранее сохраненных данных для обработки;
- экспорт результатов измерений в виде файлов для обработки в сторонних программах.

Разработка и изготовление датчиков для анализа H_2 , CH_4 . Проведение испытаний и метрологических исследований аппаратуры

Для обеспечения мониторинга газовой выделений были разработаны уникальные приборы. Работы проводились на базе кафедры физики твердого тела и наносистем Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» в лаборатории «Разработка и исследование сенсоров на основе МДП-структур».

Основой газоанализаторов является датчик Д-1. Датчики Д-1 представляют собой чувствительные элементы для измерения концентраций водорода, дейтерия, сероводорода, двуокиси азота, хлора и аммиака (таблица 2). Основным элементом датчика является МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) – структура типа $Pd-Ta_2O_5-SiO_2-Si$, электроёмкость которой изменяется при взаимодействии с газом (Рис.9). Технология изготовления чувствительного элемента представляет собой сочетание микроэлектронной технологии изготовления транзисторов и лазерной технологии напыления тонких пленок. Чувствительный элемент можно использовать для определения концентраций любого из перечисленных газов в диапазоне температур окружающей среды от -30 до $+40^{\circ}C$ с влажностью от 30 до 90%. В таблице указаны характеристики датчиков для каждого из перечисленных газов. В качестве основы для МДП-структур (Рис.8 слева) использовались пластины (4) кремния КЭФ-15 толщиной 0.4мм, покрытые пленкой SiO_2 , полученной окислением кремния с одной поверхности в сухом кислороде.

Таблица 2. Характеристики датчиков.

Газ	Диапазон измеряемых концентраций, ppm	Время отклика, $\tau_{0.9}$, мин	Время релаксации, $\tau_{0.1}$, мин	Рабочая температура, $^{\circ}C$	Срок службы ЧЭ, год
Cl_2	0,001 - 10	10	30	100 - 150	2
H_2S	0,005 - 0,3	5	15	120	1
NO_2	0,01 - 10	10	20	100 - 150	2
C_2H_5SH	0,01 - 0,3	5	15	120	1
H_2, D_2	$10^{-1} - 10^4$	0,1 - 5	0,1 - 10	100	5
NH_3	0,02 - 10	8	20	100 - 150	2

Устройство и принцип действия МДП-сенсора.

Изготавливаются две модификации МДП-сенсоров: в виде МДП-транзисторов и МДП-конденсаторов. В первом случае измеряется сдвиг порогового напряжения вольтамперной характеристики транзистора под действием испытуемого газа, во втором – изменение электроёмкости конденсатора ΔC . В основе их действия лежат одни и те же физико-химические процессы. Для изготовления датчиков были использованы МДП-конденсаторы.

В качестве основы для МДП-структур (Рис.9 слева) использовались пластины (4) кремния КЭФ-15 толщиной 0.4мм, покрытые пленкой SiO_2 , полученной окислением кремния с одной поверхности в сухом кислороде. На слой SiO_2 напылялась пленка Ta, которая затем окислялась в воздухе до Ta_2O_5 . На пленку Ta_2O_5 наносилась пленка каталитического металла (Pd, Pt, Ni) толщиной около 30 нм. Температура МДП-структуры варьировалась в

интервале 80-150⁰С. Температура измерялась терморезистором и стабилизировалась электронной схемой прибора–газоанализатора. Стандартные размеры сенсора составляли около 1 см³. На рисунке 9 справа приведена фотография сенсоров.

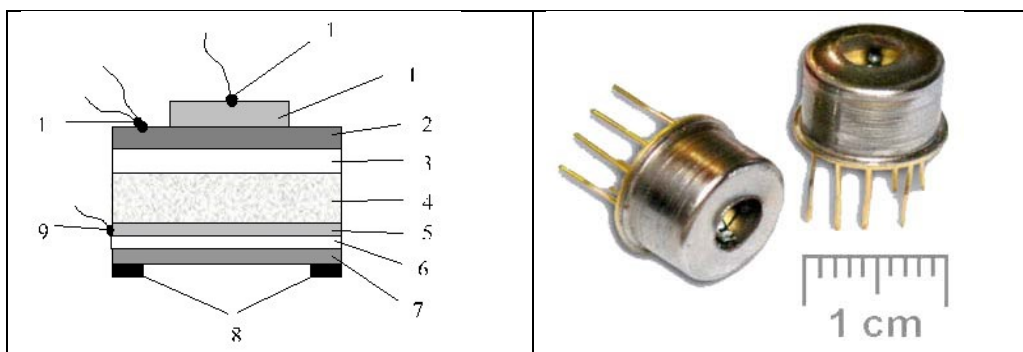


Рисунок 9. Схема рабочего элемента МДП-сенсора: 1 – пленка Pd; 2 – пленка Ta₂O₅; 3 – слой SiO₂; 4 – пластина кремния; 5 – металлический электрод; 6 – изолирующая пластина; 7 – пленочный нагреватель; 8 – электрические контакты нагревателя; 9,11 – электрические контакты МДП-конденсатора; 10 – терморезистор



Рисунок 10. Сенсор в сборе, со снятым металлическим кожухом

Чувствительность и быстродействие сенсора зависят от материала электрода. Например, если материалом электрода является палладий, то сенсор имеет очень высокую чувствительность к газам: H₂, H₂S, NO₂ и др. Если используется пленка из платины, то чувствительность сенсора уменьшается в несколько раз и ухудшается его быстродействие. Пленка иридия, по литературным данным, дает повышенную чувствительность и быстродействие к NH₃

Материал диэлектрика также сильно влияет на свойства сенсора. Если в качестве диэлектрика используется пленка SiO₂, а материалом металлического электрода служит палладий, то в атмосфере водорода наблюдается длительный временной дрейф характеристик вследствие диффузии атомов водорода вглубь диэлектрика. Если на пленку SiO₂ напыляется дополнительный слой Ta₂O₅, то временной дрейф характеристик уменьшается.

Принцип измерения концентрации газа с помощью сенсора состоит в следующем. Под действием испытуемого газа C-V-характеристика смещается влево (или вправо) по оси V. При заданном фиксированном напряжении "смещения" на сенсоре, V_{см}, измеряется величина ΔC, которая с помощью электронной схемы газоанализатора преобразуется в стандартный сигнал для наблюдения. Более детально теоретическая часть рассмотрена в работе [Литвинов 2008; Николаев и др. 2007]. Пример юстировочного графика для сенсора водорода см. на Рис. 11.

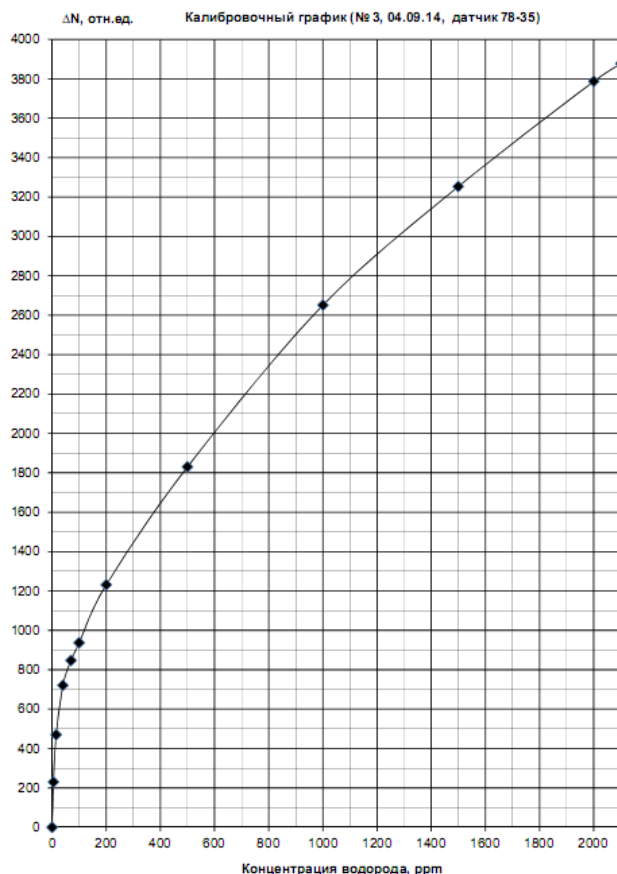


Рисунок 11. Пример графика калибровки для одного из сенсоров водорода.

Проверка работы сети мониторинга на опытном полигоне.

Опытная сеть организованная нами в 2014г представляла собой 3 беспроводных узла ML-SM-N, в каждый из которых установлен модуль сопряжения ML-SM-SVA для подключения аналогового датчика газа. Еще 2 беспроводных узла ML-SM-N без модулей сопряжения используются в качестве ретрансляторов. Все узлы были снабжены датчиками температуры.

Целью начальных работ конструирование опытного оборудования для работы сети его первичное испытание, отработка концепции использования оборудования на опытных полигонах, проверки работы сопряжения узлов и технологии разворачивания сети наблюдения.

Полевые испытания установки проводились на опытном полигоне в пределах Хибинского массива недалеко от г. Апатиты. Испытания проводились в различных ландшафтных условиях (равнинные, предгорье, горы, город) для оценки режимов прохождения радиосигналов в различных условиях.

На рис.12-13 показаны рабочие моменты размещения аппаратуры на лесном полигоне в районе Хибинского массива.

Испытания продолжались около 3 месяцев. Испытания проводились на четырех полигонах с различной ландшафтной и антропогенной нагрузкой. В целом система передачи данных соответствовала заявленным параметрам. Дальность связи между узлами достигала 500м в неблагоприятных условиях до 100м. При испытаниях алгоритм передачи данных обрабатывал 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. Результаты испытаний дали хорошую основу для разработки рабочей схемы сети мониторинга. Были определены оптимальные частоты передачи данных, системы расположения узлов сети, расположения центрального узла

Проводились юстировка газовых сенсоров (Рис. 11), контрольные замеры и эксперименты по замеру электропотребления и устойчивости к различным температурам и влажности автономных элементов сети и оценки режимов потребления передающей и измерительной аппаратуры.



Рисунок 12. Первые испытания в августе 2014г. собранного комплекта аппаратуры в Москве в районе Битцевского лесопарка (измерения проводили вдоль линии ЛЭП, максимальная дальность около 600м). Слева Баскаков Сергей принимает сигнал с данными на сервере, справа Литвинов Артур и Асавин Алексей проводят измерения содержания H_2 с помощью искусственной смеси водорода из баллона (внизу зеленый) и воздуха.



Рисунок 13. Испытания в сентябре 2014г. аппаратуры в районе восточных склонов Хибинского массива в лесу. Дальность между узлами связи составила около 300м. На левой фото крепление радиоузла на дереве. На правой фотографии Нивин Валентин держит в руках в сборе узел радиомодема и сенсора соединённого 5 м кабелем

В целом испытания прошли успешно, но был выявлен ряд основных недостатков:

- 1) небольшая дальность приёма между узлами сети 500-600м (в зависимости от густоты лесного массива)
- 2) Отсутствие решения проблемы «последней мили» для передачи данных до дата-центра.
- 3) большая энергоёмкость работы газовых датчиков и неустойчивость работы интерфейса сопряжения между сенсором и радио системой передачи данных.

Для решения этих проблем было решено использовать другие передающие антенны, провести эксперименты с GPRS модемом. Запланировано выполнить модернизацию газовых анализаторов, дополнить конструкцию встроенным контролером, снизить энергопотребление сенсоров в 1.5-2 раз. Контролер обеспечивает дискретность работы датчика, только в определённые моменты времени, что значительно снижает энергозатраты. Проверка найденных решений будет проводиться на следующем этапе работ в 2015г.

Заключение

В ходе выполнения работ по первому этапу проекта Президиума РАН № 44 на создание и поставку научно-технической продукции (НТПр) по теме **«Разработка и реализация технологий долговременного наблюдения за состоянием окружающей среды и газовой эмиссии в условиях Арктической зоны РФ на основе беспроводных сетей нового поколения и новых типов микро- и нано- сенсоров»**.

Таким образом, на изготовленной аппаратуре можно организовать полигон около 2 км² или профиль наблюдения длиной до 4 км. Опытная эксплуатация продемонстрировала соответствие системы в целом требованиям технического задания, однако, при этом, выявила ряд недоработок, связанных как с технологическим наполнением системы, так и с некоторыми деталями программного обеспечения, требующими доводки системы до начала систематического использования.

В России это первые работы на данную тему. Предлагаемая (в результате проекта 2014-201гг) полноценная реализации системы мониторинга - от разработки аппаратуры сенсоров до WEB-ГИС приложений для визуализации данных является первой и среди известных нам зарубежных проектов. В качестве близких аналогов можно привести мониторинг CO₂ CH₄ в угольных шахтах [Rajadurai et al., 2013; Ahalya et al., 2013; Mandal et al., 2013], наблюдения в активных вулканических зонах [Lopes-Pereira et al., 2013; Orlando et al., 2010] и ряд других работ. Отработанные технические и технологические решения и созданные опытные полигоны могут быть в дальнейшем использованы как опытно-методическая площадки для развития данных технологий. Найденные решения можно использовать не только как инструмент для исследования экологических проблем и предотвращения техногенных катастроф, но и для обеспечения безопасности в горнорудной, нефтяной, газовой промышленности, наблюдений за транспортными сетями и т.п.

По результатам опытной эксплуатации было разработано техническое задание на доводку системы, выполнение работ по которому будет выполнено в ходе второго этапа проекта в 2015г.

Литература.

1. Ahalya G., P.Suresh Babu, P.Prabhakar Rao, (2013) Development of coal mine safety system using wireless sensor networks //International Journal of Engineering Science & Advanced Technology 2013, V.3, I.-3, 74-78
2. Akyldiz, I.F. W. Su, , Y. Sankarasubramaniam , E. Cayirci (2002) Wireless sensor networks: a survey //Computer Networks 2002, V. 38, I. 4, 15 .P. 393–422
3. Benson, B.J., Bond, B.J., Hamilton, M.P., Monson, R.K., Han, R. (2010) Perspectives on next-generation technology for environmental sensor networks //Frontiers in Ecology and the Environment 2010, 8 (4), P.193-200.

4. Cayirci E. (2013) Wireless Sensor and Actuator Network Applications and Challenges //In Autonomous Sensor Networks. Collective Sensing Strategies for Analytical Purposes Vol. Ed: Daniel Filippini; Springer Heidelberg New York Dordrecht Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 425pp 2013, P.1-17
5. Culler, D., Estrin, D., Srivastava, M. (2004) Overview of sensor networks //Computer 2004, 37 (8), P.41-49.
6. Diamond D., Fiachra Collins, John Cleary, Claudio Zuliani, (2013) Distributed Environmental Monitoring //In Autonomous Sensor Networks. Collective Sensing Strategies for Analytical Purposes Vol. Ed: Daniel Filippini; Springer Heidelberg New York Dordrecht Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 425pp 2013, P.321-365
7. Evans William, Alexander Bahr and Alcherio Martinoli (2012) Evaluating Efficient Data Collection Algorithms for Environmental Sensor Networks //Springer Tracts in Advanced Robotics 2012, P.1-13
8. Gungor, V.C., Hancke, G.P. (2013) Industrial wireless sensor networks: Applications, Protocols, and Standards //Taylor & Frances Group., CRC Press 2013, 359 pp.
9. Hart Jane K., Kirk Martinez (2006) Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? //EarthScience Reviews 2006, 78 P.177–191
10. Kruesi, Catherine M., Rushi J. Vyas, , and Manos M. Tentzeris, (2009) Design and Development of a Novel 3-D Cubic Antenna for Wireless Sensor Networks (WSNs) and RFID Applications //Ieee Transactions On Antennas And Propagation 2009, V. 57, NO. 10, P.3293
11. Lopes-Pereira R., J. Trindade , F. Goncalves , L. Suresh , D. Barbosa , (2013) A wireless sensor network for monitoring volcanic tremors //Natural Hazards and Earth System Science (Discussions) NHESSD 2013, 1, 4305–4348,
12. Mandal R., A. Kumar, T. M. G. Kingson, RK. Pd. Verma A. Kumar, S. Dutta, S. K. Chaulya and G. M. Prasad (2013) Application of Programmable Logic Controller for Gases Monitoring in Underground Coal Mines //IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ) 2013, V.3, No.3, P. 516-522
13. Nivin V.A., Belov N.I., Treloar P.J., Timofeyev V.V. (2001) Relationships between gas geochemistry and release rates and the geomechanical state of igneous rock massifs //Tectonophysics. 2001, V. 336 (1-4), P.233-244.
14. Orlando V., Tassi Franco , Tedesco Dario , Poreda J. Robert , Caprai Antonio (2011) Submarine and inland gas discharges from the Campi Flegrei (southern Italy) and the Pozzuoli Bay: geochemical clues for a common hydrothermal-magmatic source //Procedia Earth and Planetary Science 2011, 4, P.57-73
15. Rajadurai R., S.Tamilvanan ,Geo Joe Mathai (2013) Automatic Detection of Coal Mine Monitoring System using Wireless Sensor Network //IJAIR 2013, V. 2 I. 3, P.694-698
16. Talukder Ashit , Anand Panangadan, Thomas Herrington, Alan Blumberg, Nickitas Georgias (2009) Autonomous Adaptive Resource Management in SensorNetwork Systems for Environmental Monitoring //IEEEAC 2009, paper N1348, 9pp
17. Yurganov L., Leifer I., Xiong X. (2014) Atmospheric Methane over the Arctic Ocean: Thermal IR Satellite and ShipBased Observations //Seventh International Symposium on Non-CO2 Greenhouse Gases (NCGG7), November 5-7, 2014. [Электронный ресурс] 2014, <https://www.researchgate.net/search.Search.html?type=publication&quer>
18. Zheng, J., Mitton, N., Li, J., Lorenz, P. (Ed.) (2013) Ad Hoc Networks: 4th International ICST Conference ADHOCNETS 2012 Paris, France, October 16-17, 2012 Revised Selected Papers //Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST, 2013, 111 pp,
19. Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Хазинс В.М. (2006) Водородная дегазация Земли и озоновые аномалии //ДАН. 2006, Т. 406, № 2. С.241-243.

20. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. (2005) Оценка изменения эмиссия парниковых газов из многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях глобального потепления //Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. Ред. Г.В. Менжулин. С.-Пб: Гидрометеиздат, 2009, С.114-138.
21. Аршинов М.Ю., Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, Г. Иноуйе, Ш. Максюттов, Т. Мачида, А.В. Фофонов (2009) Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений //Оптика атмосферы и океана () 2009, 22, № 5 С.457-464
22. Баскаков С.С. (2008) Стандарт ZigBee и платформа MeshLogic: эффективность маршрутизации в режиме «многие к одному» //Первая мила приложение к журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 2008, № 2—3, С. 32—37
23. Борисов, А.П. (2013) Сети и системы передачи информации //Учебно-методическое пособие Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2013. 2013, 183 стр.
24. Быкова Н (2014) Сибирский CO2 поставили на счётчик //http://strf.ru/ 2014, 3 стр.
25. Войтов Г.И. (2000) Химические и изотопно-углеродные нестабильности спонтанных газов сейсмически активных областей //Геохимия. 2000, № 11. С.1185-1208.
26. Войтов Г.И., Адушкин В.В., Гохберг М.Б. Носик л.п., Кучер М.И., Никулина И.В., Пушкин М.Г., Жогина Л.М. (1990) О химической и изотопной нестабильностях газовых струй в Хибинах //ДАН СССР. 1990, Т. 312, № 3. С.567-571.
27. Войтов Г.И., Миллер Ю.М., Нивин В.А. (1992) Об изотопно-углеродных нестабильностях CH₄ свободных газов Ловозерского щелочного массива //ДАН (Россия). 1992, Т. 322. С.681-685.
28. Гинзбург А.С., Виноградова А.А. (2009) Пути воздействия загрязнения атмосферы и изменения климата на здоровье населения //Земля и Вселенная. 2009, №3. С.45-53.
29. Глаголев М.В., Сирин А.А., Лапшина Е.Д., Филиппов И.В. (2010) Изучение потоков углеродсодержащих газов парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири //Вестник ТГПУ. 2010, Вып. 3 (93) С.120-128
30. Жиганов Е. Д. , С. Е. Красков, А. П. Мощевикин. (2007) Исследование условий применимости приемопередатчиков стандарта Nanonet в беспроводных сетях датчиков //Беспроводные технологии. 2007, № 1, С.65-69, №2, С.62-6
31. Икорский С.В. и Нивин В.А. (1984) Опыт изучения горючих газов изверженных горных пород на руднике Ловозерского ГОКа //Горный журнал. 1984, № 11. С.55-58.
32. Икорский С.В., Нивин В.А., Припачкин В.А. (1992) Геохимия газов эндогенных образований. //СПб.: Наука. 1992, 179 стр.
33. Кароль И.Л., Киселев А.А. (2004) Атмосферный метан и глобальный климат //Природа. 2004, № 7. С.47-52.
34. Козырев А.А. (2001) Геодинамическая безопасность на рудниках Кольского полуострова //Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения подземного пространства северо-запада России. Апатиты: ГоИ КНЦ РАН. 2001, С.21-39.
35. Козырев А.А., Ловчиков А.В., Пернацкий С.И., Шершеневич В.А. (2002) Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро»: горнотехнические аспекты //Горный журнал. 2002, № 1. С.43-49.
36. Кузнецов Н. В. (2014) Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2013 году. — //г. Нижний Новгород: ИП 2014, 152 стр.
37. Литвинов А.В. (2008) Стабилизация характеристик и модель механизма чувствительности МДП-сенсоров к газам. //Автореферат диссерт. канд. ф-м. н. Москва МИФИ 2008, 36 стр.

38. Ловчиков А.В. (2004) Оценка относительной геодинамической опасности удароопасных месторождений по энергии сильнейших сейсмопроявлений при их разработке Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Часть 2. //Сборник докладов Международного совещания. (Кировск, Мурманская обл., Россия, 14-16 апреля 2004). Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004, С.86-94.
39. Мельников Н.Н. (2002) Ред. Н.Н. Мельников. Сейсмичность при горных работах //Апатиты: ГОИ КНЦ РАН. 2002, 325 стр.
40. Нивин В.А. и Аведисян А.А. (2007) Первый опыт профильной газовой съемки по подпочвенному воздуху на Ловозерском нефелин-сиенитовом массиве //Геология и минералогия Кольского региона. Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции и IV Ферсмановской научной сессии, посвященных 90-летию со дня рождения акад. А.В. Сидоренко и д.г.-м.н. И.В. Белькова. Апатиты, К & М. 4-6 июня 2007, С.239-241.
41. Нивин В.А. (1989) О возможных газогеохимических и газодинамических критериях оценки тектонофизического состояния локальных участков изверженных горных пород //ДАН СССР. 1989, Т. 308, № 6. С.1453-1457.
42. Нивин В.А. (1991) Основные принципы и меры газобезопасного ведения подземных горных работ на рудниках ПО "Апатит" //Горный журнал. 1991, № 8. С.34-36.
43. Нивин В.А. (2006) Углеводородные газы свободной фазы в нефелин-сиенитовых магматических комплексах как продукт природного абиогенного синтеза //Генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС. 2006, С.130-138.
44. Нивин В.А. (2009) Диффузно-рассеянные водородно-углеводородные газы в породах нефелин-сиенитовых комплексов //Геохимия. 2009, № 7. С.714-733.
45. Нивин В.А. (2013) Газовые компоненты в магматических породах: геохимические, минералогические и экологические аспекты и следствия. Автореферат дисс. докт. геол.-мин. наук (спец. 25.00.09). //Москва: ОНТИ ГЕОХИ РАН, 2013, 51 стр.
46. Нивин В.А., Ловчиков А.В., Рахимов Р.Г. (2009) Первые результаты мониторинга хода водорода и сопоставления полученных данных с сейсмичностью на руднике «Карнасурт» (Ловозерское редкометалльное месторождение, Кольский полуостров) //Труды VI Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии. Апатиты: К & М. 2009, С.190-192.
47. Николаев И.Н., Литвинов А.В., Емелин Е.В. (2007) Возможности использования МДП-сенсоров в качестве чувствительных элементов газоанализаторов //Датчики и системы. 2007, № 5. С.66-73.
48. (2014) Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2013 год. //М.: РОСГИДРОМЕТ, 2014, 228 стр.
49. Онохин Ф.М. (1959) Горючие газы Хибинского щелочного массива //Советская геология. 1959, № 5. С.109-118.
50. Петерсилье И.А. (1964) Геология и геохимия природных газов и дисперсных битумов некоторых геологических формаций Кольского полуострова.. //М.-Л.: Наука. 1964, 171 стр.
51. Сергиенко В.И., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. (2011) 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, 31 марта 3 апреля 2010 г., Архангельск. 2011, С.117-136.

52. Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Окладников И.Г., Юрова А.Ю., Гордов Е.П., Лыкосов В.Н. (2011) Подходы к моделированию и мониторингу источников и стоков метана и углекислого газа в региональной климатической системе Западной Сибири. //В: Избранные труды Международной молодежной школы и конференции CITES-2011, Томск, 3 – 13 июля 2011, С.140-143.
53. Сывороткин В.Л. (2002) Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. //М.: ООО «Геоинформцентр», 2002, 250 стр.
54. Сывороткин, В.Л. (2013) Глубинная дегазация, озоновый слой и погодные аномалии в Северном полушарии летом 2013 г.: майская жара и июльский холод в Центральной России; июньские наводнения и июльская жара в Европе, жара в Гренландии //Пространство и Время. 2013, № 3(13). С.163–171.
55. (2004) Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. //Сб. докладов Международного совещания. (Кировск, Мурманская обл., Россия, 14-16 апреля 2004). Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН 2004, Ч. 1-2. 226 стр.
56. Тимашев С.Ф., Нивин В.А., Сывороткин В.Л., Поляков Ю.С. (2011) Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе динамики выделения водорода в Хибинском и Ловозерском массивах (Кольский полуостров) //Динамические явления в сложных системах. Казань: МОиНРТ. 2011, С.263-278.
57. Хитаров Н.И., Кравцов А.И., Войтов Г.И., Фридман А.И., Ортенберг Н.А., Павлов А.С. (1979) Газы свободных выделений Хибинского массива //Советская геология. 1979, № 2. С.62-73.
58. Шахова Н.Е. (2010) Метан в морях Восточной Арктики. //Автореф. дис... доктора геол.-мин. наук. М., 2010, 49 стр.
59. Юдахин Ф.Н., Боголицын К.Г., Щеголева Л.С. (2011) Экологические проблемы арктических и приарктических территорий России //Материалы выездного совместного совещания Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН и научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики, 31 марта – 3 апреля 2010 г., Архангельск. 2011, С.77-102.