

# Организация геоэкологического мониторинга газовой эмиссии в Арктике: методики и перспективы современных беспроводных технологий

А. М. Асавин<sup>1</sup>

ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН

В. А. Нивин<sup>2</sup>, доктор геолого-минералогических наук

ФГБУН Геологический институт Кольского научного центра РАН

*Рассмотрены инструменты и методики мониторинга эмиссии парниковых газов в российской Арктике. На основе наблюдений за выделением литосферных водорода и метана в районе Хибинских и Ловозерских тундр, а также литературных данных сформулированы ограничения традиционных методов газового мониторинга. Предложено использовать новые методы наблюдений на основе беспроводных сенсорных систем. На примере территории центральной части Кольского полуострова рассмотрен весь комплекс проблем и вопросов, возникающих при развертывании подобных наблюдений в условиях Заполярья. Основная задача, которую необходимо решить для построения таких систем, – разработка специализированных низкоэнергетических газовых сенсоров. Важным моментом является интеграция сложных аппаратно-программных технологий в единую эффективную систему мониторинга.*

**Ключевые слова:** мониторинг, эмиссия газов, методы наблюдений, беспроводные сенсорные системы.

## Введение

Газы, выделяющиеся из земных недр, непосредственно влияют на литосферу, атмосферу, биосферу и ноосферу. 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 [11]. Очевидно, что арктический регион оказался наиболее чувствительным к глобальным изменениям климата,

прежде всего к потеплению [7; 20]. Именно это все чаще связывается не только с более быстрым накоплением здесь парниковых газов, образующихся в первую очередь 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 др. Все это обуславливает необходимость организации мониторинга выделяющихся в атмосферу экологически вредных и опасных газов. В связи с обширностью и малонаселенностью территории, а также пространственной неравномерностью и временной нестабильностью газовых эмиссий система такого рода наблюдений в Арктике должна: (а) быть автономной и малоэнергоёмкой, (б) иметь возможность длительного мониторинга

<sup>1</sup> e-mail: alex06@inbox.ru.

<sup>2</sup> e-mail: nivin@geoksc.apatity.ru.

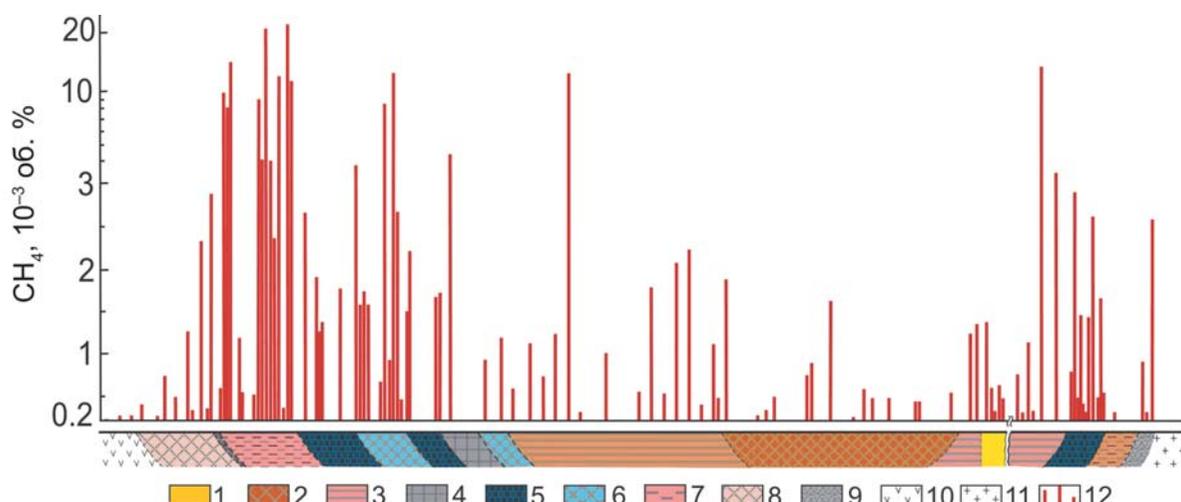


Рис. 1. Концентрации метана в подпочвенном воздухе по объединенному профилю через Хибинский массив: 1 – карбонатиты, 2 и 3 – хибиниты массивные и трахитоидные, 4 – ийолит-уртиты, 5 – рисчорриты, 6 – лявочорриты, 7 и 8 – фойяиты трахитоидные и массивные, 9 – фениты по гранито-гнейсам, 10 – протерозойские вулканиты, 11 – гнейсо-граниты, 12 – содержания  $\text{CH}_4$

на значительных по размеру наблюдательных полигонах или профилях, (в) отслеживать одновременно несколько параметров с достаточно высокой частотой измерений, (г) обеспечивать дистанционное управление аппаратурой сети с возможностью удаленного получения данных и изменения параметров измерений. Автоматизация систем мониторинга в результате появления новых разработок в области микроэлектроники и средств передачи данных позволяет подойти к решению этой задачи. Ниже мы попытались рассмотреть новые технологии мониторинга с помощью беспроводных сетей наблюдения, оценить перспективы их использования для мониторинга эмиссии газов и организации опытно-методических полигонов таких измерений в арктических районах.

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

Основой хозяйственной деятельности в этом районе, как и на многих других территориях российской Арктики, является добыча и обогащение минерального сырья: апатито-нефелиновых руд в Хибинской ПТС и редкометалльных в Ловозерской. Общие размеры района — около 90×60 км.

Одной из примечательных особенностей Хибинского и Ловозерского щелочных массивов являются эманации необычных для магматических комплексов водородно-углеводородных газов [6]. Главным компонентом газовой фазы является метан, подчиненными — молекулярный водород (иногда он преобладает) и этан. В качестве микрокомпонентов присутствуют более тяжелые гомологи метана (до пентанов включительно), непредельные углеводороды

и гелий. Изучение этих свободно выделяющихся газов (СВГ) помимо научного интереса всегда имело и практическую направленность. В первую очередь это вызвано тем, что, являясь горючими и взрывоопасными, компоненты СВГ могут накапливаться до опасных концентраций в атмосфере подземных рудников, обрабатывающих Хибинские апатитовые и Ловозерские редкометалльные месторождения, создавая серьезную угрозу для нормального течения технологического цикла ведения горных работ, а также для здоровья и жизни горняков [11; 7 и др.]. Имеющиеся оценки [4; 12] позволяют также предполагать, что эманации из щелочных массивов могут вносить заслуживающий внимания и дальнейшего изучения вклад в баланс  $\text{CH}_4$  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 [16; 17]. Пока роль глубинного  $\text{H}_2$  в образовании так называемых озоновых дыр оценивается по-разному — от определяющей [16] до практически никакой [1; 8]. Несмотря на то что неоднократно наблюдалось соответствие между интенсивностью эманаций водорода из Хибинского и Ловозерского массивов и локализацией отрицательных аномалий стратосферного озона в регионе, необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

Особенности изменения газометрических показателей рассматриваются также в качестве потенциальных предвестников имеющих место при разработке Хибинских и Ловозерских месторождений опасных динамических проявлений горного

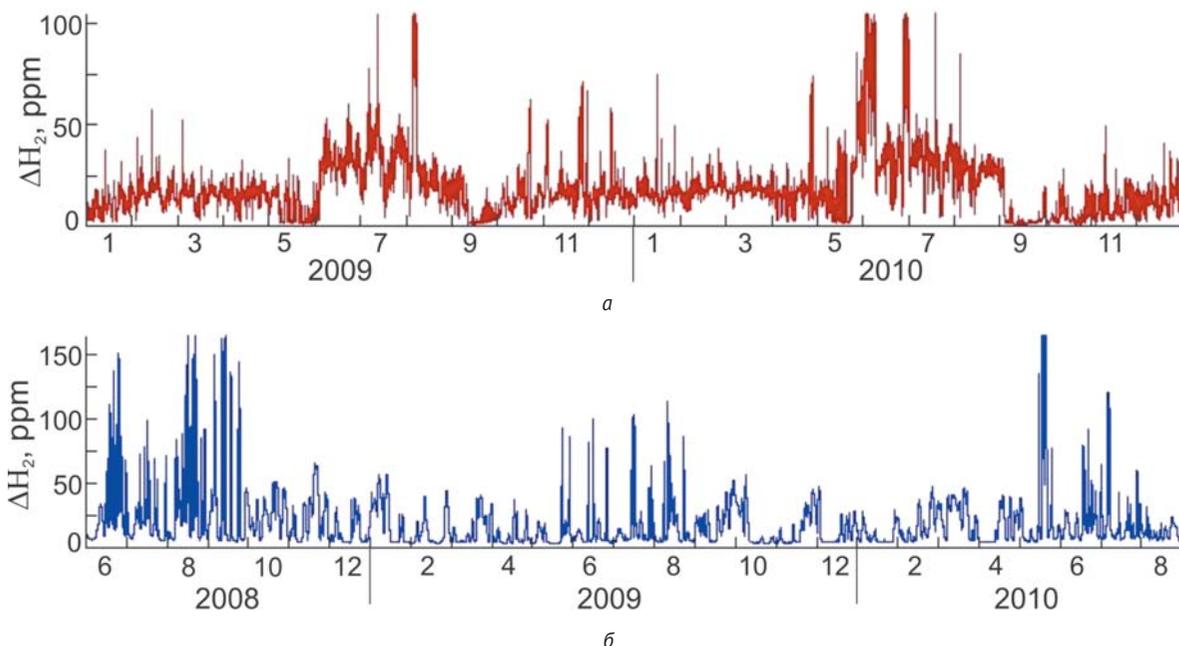


Рис. 2. Динамика хода молекулярного водорода в щелочных массивах: а – Хибинский массив, б – Ловозерский массив. Горизонтальная ось – год и месяц

давления — горных и горно-тектонических ударов и мелкофокусных природно-техногенных землетрясений [47].

Для свободно выделяющихся газов в щелочных массивах характерны неравномерность локализации (рис. 1) и широкие временные вариации интенсивности выделения (рис. 2). Неравномерность распределения проявляется на разных шкалах — от долей метра до массива в целом [11]. Наблюдения за эмиссией молекулярного водорода в обоих массивах выявили нестационарную полиритмичность газовой выделения [18]. Нестабильность потока выделяющихся газов определяется, по-видимому, многими причинами, важнейшими из которых являются геодинамическая и сейсмическая активность массивов, а также метеорологические, космические и техногенные факторы.

Несмотря на более чем полувековую историю исследований, происхождение водородно-углеводородных газов в щелочных массивах остается предметом дискуссий. С нашей точки зрения, свободно выделяющиеся газы представляют собой смесь из разных источников: (а) оставшихся в микротрещинах при консолидации массивов захвата флюидными включениями и потерь в процессе дегазации; (б) просачивающихся из глубоких частей массивов или остаточных промежуточных магматических очагов, где они до настоящего времени могут генерироваться по реакциям типа Фишера — Тропша; (в) образующихся за счет механохимических реакций и частичного высвобождения газов из флюидных микровключений в минералах в условиях постоян-

но изменяющегося напряженно-деформированного состояния породного массива [11].

В болотных экосистемах на территории рассматриваемых ПТС можно ожидать эмиссию углеродсодержащих парниковых газов, хотя, видимо, меньшую, чем, например, в ряде районов арктического побережья и Западной Сибири [5 и др.].

Ближайшая (одна из пяти постоянно действующих в России в настоящее время) станция Росгидромета, измеряющая концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы, находится в Терiberке, на побережье Баренцева моря [20]. В городах Апатиты и Кировск работают стационарные посты Росгидромета, контролирующие содержание в атмосферном воздухе основных загрязнителей от промышленных предприятий и автотранспорта (взвешенных веществ, оксидов азота, диоксида серы, оксида углерода) с трех-четырёхразовым отбором проб в течение суток [8].

### Методы газометрических наблюдений, их ограничения и перспективы развития

Свободно выделяющиеся газы щелочных массивов изучались нами и другими исследователями преимущественно в горных выработках подземных рудников, в пределах эксплуатируемых апатитовых и редкометальных месторождений. Наиболее информативным при этом оказался шпуровой метод. Суть его заключается в бурении горизонтального шпура диаметром около 40 мм и глубиной около 2 м в стенке горной выработки и герметизации его тем или иным способом на расстоянии 20—40 см от устья сразу после окончания бурения. Через герметизирующее устройство или цементную пробку проходят одна или две

тонких трубки, позволяющих периодически отбирать пробы газоздушнoй смеси из изолированной части канала шпура для последующего анализа, измерять дебит (т. е. приток геогаза в шпур) и величину избыточного давления газовой фазы с помощью простых приспособлений. В случае низкодебитных шпуров интенсивность выделения газов из пород устанавливалась по приращению концентраций неводоудных компонентов в отобранных пробах.

Более общие представления о газоносности пород и масштабах газовыделения, оценки абсолютной и относительной газообильности рудников получали путем массового опробования атмосферы отдельных горных выработок, а также исходящих вентиляционных струй. В этом случае пробы отбирались путем выливания заполненной соевым раствором бутылки объемом 0,25 л. Пробы подпочвенного воздуха в ходе приповерхностной газовой съемки отбирались из загерметизированных в приустьевой части субвертикальных скважин глубиной от 0,7 до 1,4 м, проходимых вручну в рыхлых отложениях.

Содержание молекулярного водорода в подпочвенной атмосфере определялось высокочувствительным (разрешающая способность — 0,0001 об. %) портативным газоанализатором ВГ-3 [12]. Диапазон измерений концентрации водорода в воздухе — от 0,0001 до 0,01 об. % (1—100 ppm), разрешающая способность — 0,0001 об. %, относительная ошибка —  $\pm 3\%$ , период записи в память — от 1 с до 99 ч. Хорошо зарекомендовавший себя в процессе мониторинга временных вариаций  $H_2$  в стационарных условиях для газовой съемки прибор ВГ-3 оказался не столь эффективен как раз из-за высокой чувствительности. Есть основания предполагать, что на его показания влияет не только концентрация водорода, но и изменения инсоляции, барометрического давления, температуры и влажности на поверхности и в скважине.

Использованные методы позволили решить многие вопросы, связанные с эмиссией литосферных газов в Хибинской и Ловозерской ПТС. В частности, изучен состав газовой фазы, показана нестабильность газовыделения во времени, выявлены некоторые особенности пространственной локализации и динамики выделения отдельных компонентов, намечены факторы, обуславливающие эти особенности.

На станциях Росгидромета обычно устанавливается высокая (до 300 м) мачта, на разных уровнях которой крепятся устройства забора проб воздуха (до нескольких литров). В дальнейшем пробы анализируются в лаборатории на содержание  $CH_4$  и  $CO_2$ .

В настоящее время наряду с традиционными исследованиями газовой фазы путем отбора проб и последующего их анализа в лабораториях активно развиваются новые методы непосредственного измерения состава газов в режиме реального времени. Такие методы позволяют организовать длительно действующие полигоны мониторинга. Для этого разрабатываются специализированная аппаратура

и особые приемы обработки результатов, в том числе аэро- и фотоданных и мультиспектральных космических снимков [3; 2]. При таком долговременном мониторинге используются постоянные источники тока и весьма дорогостоящее оборудование. Однако всего лишь восемь станций наблюдения на территории Западной Сибири — это скорее точка отсчета для оценки динамики эмиссии парниковых газов, чем реально действующая система сбора данных. В рейсах научно-исследовательских судов измерения концентрации метана в приземном слое атмосферы, а также метана, растворенного в воде, проводились методом прямых измерений с помощью высокоточного скоростного  $CH_4$ -анализатора (HAFMA, DLT-100, USA) [21]. Аналогичные методы прямого измерения содержания газов в атмосфере используются при анализе вулканической активности [48; 42].

К принципиальным ограничениям большинства упомянутых методик следует отнести эпизодичность измерений и непродолжительный период возможных наблюдений, обусловленный коротким полевым сезоном экспедиционных работ в Арктике. Кроме того, существующие методы не позволяют одновременно отслеживать вариации более одного-двух газовых компонентов и при этом измерять другие параметры среды. Преимущественно эпизодический характер газометрических исследований не дают возможности говорить о мониторинге в полном смысле слова как о системе регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, а также прогноза интенсивности газовыделения.

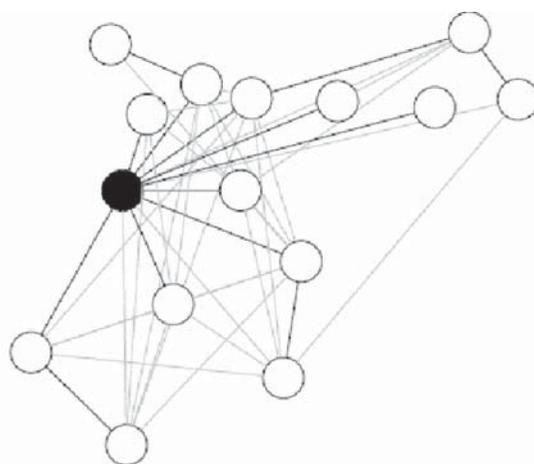
Так, давно назревшая необходимость подобного мониторинга динамики выделения природных горючих газов при отработке месторождений минерального сырья Хибинского и Ловозерского массивов реализована лишь отчасти и только в отношении молекулярного водорода. Поскольку на этих горных массивах на выделение геогазов может оказывать влияние большое количество разных процессов и факторов, для выявления закономерностей пространственно-временных вариаций газовых эмиссий необходим их долговременный мониторинг с параллельным отслеживанием изменений многих других параметров среды. Это сложная научная и технологическая задача, однако только успешное ее решение позволит оперативно анализировать собранные данные и повысит надежность экологических прогнозов. Одной из наиболее перспективных современных технологий в микроэлектронике и информатике, позволяющей разработать альтернативные методы мониторинга и решить поставленную задачу, является технология беспроводных сенсорных сетей (wireless sensor networks — WSN).

### **WSN-технологии и их преимущества**

Беспроводная сенсорная сеть (далее WSN) представляет собой распределенную, самоорганизующуюся, устойчивую к отказам отдельных элементов



а



б

Рис. 3. Полигон в Альпах (а), где на участке расположено 18 узлов WSN, и их пространственное расположение (б). В автономном режиме сеть работала в течение трех месяцев [30]

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. Обмен информацией между узлами системы происходит по беспроводным каналам связи в радиодиапазонах 2,4 ГГц и 870—930 МГц по стандарту IEEE 802.15.4.

Подробности технического обеспечения построения WSN достаточно детально изложены, например, в [23; 34; 24]. Существует также ряд специализированных учебников [33] и периодических журналов («Wireless Sensor Network», «International Journal of Sensor Networks» (IJSNet), «Ad Hoc Network», «IEEE Sensors», «EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking»). Здесь мы лишь кратко остановимся на технических возможностях данных сетей для целей экологического мониторинга.

Сеть состоит из рабочих и управляющих узлов — узлов. Через управляющие ноды данные собираются и передаются в компьютер, производится управление и настройка работы сети. К рабочим нодам подключается сенсорное оборудование для определения параметров окружающей среды.

Программное обеспечение сетей основано на интернет-протоколах. Однако специфика передачи данных по радиоканалу и эволюция программного обеспечения привели к развитию собственного протокола XBee-ZigBee, который в основном и используется в настоящее время в большинстве проектов по мониторингу природной среды. Наиболее интересная возможность последних лет — это развитие топологии Mesh-сетей. В отличие от старых протоколов в современных сетях каждый из узлов может выполнять роль рабочих и управляющих нодов, как получать, так и передавать данные от соседей.

Замечательным свойством беспроводных сенсорных сетей является их автономность и низкое энергопотребление. Например, при мощности передатчика «MaxStream XBee Ser» 2,2 мВт напряжение при передаче сигнала составляет 2,1—3,6 В, ток — 35 мА, а в режиме сна ток падает ниже 1 мкА. За счет режима перехода в гибернацию и оптимального выбора режима запросов к узлам сети появляется возможность на батарейках стандарта AA обеспечить работу узлов сети в течение нескольких месяцев.

Расстояние между узлами обычно соответствует прямой видимости на местности, однако в сложном рельефе для большей надежности работы сети рекомендуется проводить дублирование узлов для передачи данных. Таким образом, все зависит от конкретных условий наблюдения и используемой аппаратуры, а дальность приема может составлять от сотен метров до 10 км. Весьма ограниченный опыт построения таких радиосетей в горной местности, например в Альпах [30], показал необходимость создания в сети некоторой избыточности узлов передачи данных (рис. 3).

На рабочем узле обычно располагаются один-два сенсора. Стандартно измеряются температура, давление, влажность. Возможности современной аппаратуры узла WSN очень широки. Можно подключать до 16 устройств или меньше их количество, но с большим числом измеряемых параметров. Поскольку узлы можно располагать достаточно близко друг к другу, в точке наблюдения одновременно измеряется практически неограниченное число характеристик природной среды.

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.

**Таблица 1. Сравнение рабочих характеристик сенсоров NDIR (неразрушающие инфракрасные сенсоры) CO<sub>2</sub> одноканальных с близкой точностью (по [32]).**

Сенсор	Производитель	Измеряемое значение	Точность (при стандартных условиях, отн. %)	Потребляемый ток, В	Мощность, мВт	Время нагрева, с (выхода в рабочий режим)
<i>LED/PD (диодный источник с узким спектром (середина инфракрасного света) — фотодиодный детектор (регистратор)</i>						
«COZIR Ambient»	GSS	До 5000 ppm	± 50 ppm (3%)	3,2—5	3,3	1,2 (первое включение)
«COZIR Wide Range»	GSS	0,5—100%	± 70 ppm (5%)	3,2—5	3,3	1,2 (первое включение)
ULP	GSS/SEI	До 3000 ppm	± 50 ppm (3%)	3,6	0,07	5
<i>Нагреватель: пиро- или термоэлектрический детектор</i>						
«CO <sub>2</sub> Engine K30 FR»	«SenseAir»	До 5000 ppm	± 70 ppm (5%)	4,5—14	315	60
KCD-AN 100x	«SenseCube»	До 10 000 ppm	± 4% FS (3%)	8—14	560	Включен постоянно
«OS IAQ Sensor VS»	«OptoSense AS»	До 2000 ppm	± 50 ppm	16—38	500	< 60
S-100	TCC ELT	До 10 000 ppm	± 30 ppm (5%)	5	100	Включен постоянно
S8	«SenseAir»	До 10 000 ppm	± 70 ppm (3%)	4,5—5,25	135	Включен постоянно
«Telaire 6613»	«GE Telaire»	До 2000 ppm	± 30 ppm (5%)	5	165	< 120 (первое включение)

Пространственная привязка сети к цифровой модели местности, геологическим и другим картам позволяет получить зависимости наблюдаемой эмиссии газов от различных природных параметров, перейти к прогнозируемому моделированию. В настоящее время технологии взаимодействия WSN с различными проектами ГИС активно развиваются на основе интернет-коммуникаций — ГИС-Web технологии, удаленные web-сенсоры [35; 36; 46; 41], технологии «умный дом», «интернет-вещи» — устройства, которые комбинируют облачные технологии и сенсоры окружающей среды [45; 37].

На этом перечислении основных преимуществ технологии можно остановиться и задаться вопросом: почему до сих пор число проектов с постоянно действующими системами мониторинга на основе WSN ограничено, а в России вообще неизвестно? Представляется, что сейчас основным препятствием для создания систем мониторинга, основанных на технологии WSN, является отсутствие или нехватка адаптированных для них сенсорных устройств измерения параметров среды, включая концентрации газов, а также соответствующих методик сбора и обработки данных. Хотя простейшие устройства

измерения, температуры, давления, влажности или освещенности серийно выпускаются и широко используются с рядом стандартных промышленных датчиков, например, с цифровыми датчиками температуры PT100, PT1000 и «Dallas 18S20», которые в том числе реализуются и в России [13].

### Газовые сенсоры

Первые автономные газовые сенсоры появились почти одновременно с разработкой технологии WSN. Однако они, как и анализаторы гидрохимического состава водных сред, датчики распределения микрочастиц и т. п., все еще не получили статус серийных образцов, а разрабатываются под конкретный проект и не имеют единых конструктивных узлов сопряжения и характеристик электропитания. Спецификой таких устройств должны быть низкое энергопотребление, миниатюрность, возможность сопряжения по интерфейсу RS232 или RS485 с устройством передачи данных. Важной особенностью газоанализаторов, которые должны использоваться в российских условиях мониторинга, является их работоспособность при отрицательных температурах.

Многие газоанализаторы, выполненные для стационарных проводных сетей мониторинга, могут быть сопряжены с WSN-сенсорами после некоторой доработки, поскольку интерфейс сопряжения RS232 стандартно используется ими для сброса данных в компьютер или логгер. Наиболее распространены датчики CO и CO<sub>2</sub>, которые поставляются как промышленные образцы [52]. В недавнем обзоре инфракрасных сенсоров, адаптированных для WSN [32], приведены сравнительные характеристики ряда промышленно выпускаемых образцов (табл. 1).

Для примера можно упомянуть, что разработка этих исследователей на основе фотодиодного детектора Al-Ga-In-As-Sb, работающего в средних частях инфракрасного диапазона, способна функционировать около 15 лет без перезарядки в режиме постоянного мониторинга содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. Существуют опытные образцы газоанализаторов и для определения более редких газов. В наших работах мы использовали уникальные разработки кафедры физики твердого тела и наносистем Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» [12]. Основой является датчик Д-1, который представляет собой чувствительные элементы для измерения концентраций водорода, дейтерия, сероводорода, двуокиси азота, хлора и аммиака. Основной элемент датчика — МДП (металл-диэлектрик-полупроводник), структура типа Pd-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si, электроемкость которой изменяется при взаимодействии с газом. Диапазон измеряемых концентраций водорода составляет 10<sup>-1</sup>—10<sup>4</sup> ppm, время отклика и время релаксации 0,1—5 мин, срок службы — 4—5 лет.

#### Опыт использования технологии WSN для мониторинга газовых эманаций

Некоторый обзор экологических проектов, выполненных на основе WSN, представлен в [48; 51; 54]. Опубликован ряд монографий по данной теме [38; 29 и др.]. Не претендуя на полноту описания существующих на сегодня проектов, рассмотрим недавние работы, касающиеся мониторинга газовых эманаций из литосферы.

Результаты реализованных проектов в области угольной промышленности представлены в статьях [49; 22; 43]. В основном авторы измеряют содержания CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и O<sub>2</sub> в разрывных нарушениях и горных выработках. Прежде всего рассматривается проблема прогноза подземных взрывов газа и пожаров за счет раннего предупреждения аварийных ситуаций (мониторинг H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). Выше упоминались работы по анализу состава газов при вулканических эманациях [31; 40]. По радиоканалу GSM осуществлялась передача данных при мониторинге газовых эманаций ряда японских вулканов [55] и Этны [28; 40]. Автономность работы аппаратуры обеспечивалась солнечными батареями.

Газовые эманации из органического слоя почв активно исследовались с применением WSN-

технологии. Большое количество (около 100) сенсоров CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S было развернуто на опытных полигонах в Финляндии [26]. Эта программа является частью крупного международного проекта STRIVE [27].

Серьезные проблемы применения технологии связаны с разработкой методики измерений, адаптированной для узлов WSN. В настоящее время при традиционных схемах мониторинга газа основные усилия исследователей направлены на численную оценку величины потока газов. Для этого применяются различные подходы, детально описанные в соответствующей литературе [38; 39]. Наиболее широко используются методы, основанные на раздельном определении концентраций газов в последовательных объемах за фиксированное время. Например, при оценке потока метана на болотах используются мерные газонепроницаемые короба — «метод закрытых камер» [5; 15]. Определяя концентрацию газа в равных объемах, расположенных на разной высоте от источника эманации C<sub>up</sub> и C<sub>down</sub>, можно оценить газовый поток Flux по уравнению

$$\text{Flux} = \beta \delta w (C_{\text{up}} - C_{\text{down}}),$$

где  $\delta$  — относительная точность определения концентрации примеси в атмосфере;  $\beta$  — постоянная, которая определяется по измерению другого параметра (как правило, она определяется при наладке установки измерения состава газа и обычно равна 0,6);  $w$  — абсолютная разница между мгновенной и усредненной скоростями потока (по существу это параметр, определяющий вихревую составляющую потока или близость потока к ламинарному течению) [39].

Его называют уравнением установившегося вихревого кумулятивного потока (relaxed eddy accumulation — REA или conditional sampling). Дальнейшее развитие этого подхода привело к разработке ряда методик — пульсационных измерений, турбулентной аккумуляции, градиентного потока и др. С точки зрения аппаратного обеспечения такие методики не слишком подходят для WSN-технологии, поскольку требуют оборудования на прокачку газа (микронасос), значительного разнесения резервуаров, стационарного электропитания. Для WSN-измерений необходимо подобрать или разработать методику мониторинга для оценки потока газов, основанную на соответствующей математической модели распространения редких газов в атмосфере.

В этой связи большое значение приобретает возможность подключения к узлу нескольких сенсоров с независимым управлением измерениями. Это позволяет, например, разнести подключенные к узлу сенсоры на значительное (20—50 м) расстояние по вертикали и применить метод градиентного потока (Gradient Flux). Другой вариант — использование метода ковариантного трассера (Eddy Covariance Tracer). Например, в качестве трассера можно

использовать температуру, поскольку ее градиент определяется довольно легко, а также содержание водяного пара или  $\text{CO}_2$ . Оценив профиль изменения средней скорости ветра и температуры для двух высот и предположив, что измеряемый газ распространяется тем же способом, что и температура, можно по уравнению термодиффузии оценить величину потока интересующей нас примеси.

Из этих кратких замечаний видно, что методика проведения наблюдений и метрология измерений с помощью WSN крайне важны и, к сожалению, на сегодня не разработаны. Еще одной новой проблемой для исследователей, проводящих газовый мониторинг с помощью WSN, являются обработка и анализ большого объема собираемых данных. На одном узле может измеряться до 10—20 величин, причем с частотой от минут до часов. Таких узлов в сети может быть несколько десятков. Следовательно, за месяцы работы накапливается до нескольких миллионов записей, а за год — десятки миллионов. В целом следует быть готовым, что при развертывании полноценной системы мониторинга придется столкнуться с технологиями программирования сверхбольших баз данных для организации системы хранения, обработки и реанализа информации.

С вопросами анализа и хранения информации также тесно связано использование ГИС-Web интерфейса [44; 25], создание базы данных и представления результатов мониторинга. Этим вопросам сейчас уделяется пристальное внимание. Проведено несколько крупных конференций (EmNetS-II 2005, GLOBECOM 2010), разработан ряд пилотных проектов [51; 54; 27]. Но следует признать, что, хотя теоретические разработки и программные решения и позволяют с оптимизмом смотреть на решение этих вопросов, публикаций, посвященных работе WEB-порталов с действующими долговременными системами мониторинга, пока нет.

## Заключение

Подводя итоги обзора современных средств, методик и проблем, касающихся WSN-мониторинга, можно сделать вывод, что это сложное динамически развивающееся мультидисциплинарное направление, которое имеет огромные перспективы в самых разных областях. Результаты, полученные при реализации пилотных проектов по мониторингу, пока в большей степени лишь дают представление о технических возможностях технологий, чем посвящены анализу результатов и их научному приложению. Несомненно, аналогичные проекты должны развиваться и в нашей стране. Выше уже говорилось о научной актуальности проблематики, касающейся эмиссии газов в районах Арктики. Из-за отсутствия инфраструктуры и сложности полевых наблюдений технические решения на основе WSN представляются чрезвычайно подходящими для наших регионов. При наличии разработок, доходящих до стадии экспериментальных образцов, интеграционный проект,

объединяющий исследователей различных направлений, мог бы быть крайне успешным и дать хороший опыт развертывания и эксплуатации сети мониторинга, основанной на новых технологиях.

Необходимо иметь опытный полигон в Арктике, где можно было бы проводить долговременные натурные испытания различных газовых сенсоров, обрабатывать определение концентраций газовых компонентов как в полевых, так и в лабораторных условиях, испытывать новые конструкции сенсоров и устройств передачи данных. Нам представляется, что Кольский научный центр РАН, Хибинская и Ловозерская ПТС являются наиболее подходящей базой для организации таких работ.

Разработки экологической модели развития крупного промышленного района не могут опираться на частные определения ведущих параметров состояния среды. Это должны быть достаточно хорошо обоснованные усредненные цифры или надежные функциональные зависимости динамики изменения условий среды на долговременный период. Иначе прогнозы сложных природных процессов, являющиеся суперпозицией взаимозависимых факторов, невозможно рассчитать на длительную перспективу. Чтобы построить достоверные и продуктивные прогнозные модели, необходимы постоянный мониторинг обстановки, проведение теоретических расчетов и разработка новых средств наблюдения и прогнозирования состояния окружающей среды.

## Литература

1. Адушкин В. В., Кудрявцев В. П., Хазинс В. М. Водородная дегазация Земли и озоновые аномалии // Докл. Рос. акад. наук. — 2006. — Т. 406, № 2. — С. 241—243.
2. Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К. и др. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, № 5. — С. 457—464.
3. Бынова Н. Сибирский  $\text{CO}_2$  поставили на счетчик // <http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&id=91313#.VRzeGfmsV8E>.
4. Войтов Г. И. Химические и изотопно-углеродные нестабильности спонтанных газов сейсмически активных областей // Геохимия. — 2000. — № 11. — С. 1185—1208.
5. Глаголев М. В., Сиринов А. А., Лапина Е. Д., Филиппов И. В. Изучение потоков углеродсодержащих газов парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // Вестник ТГПУ. — 2010. — Вып. 3 (93). — С. 120—128.
6. Икорский С. В., Нивин В. А., Припачкин В. А. Геохимия газов эндогенных образований. — СПб.: Наука, 1992. — 179 с.
7. Кароль И. Л., Киселев А. А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. — 2004. — № 7. — С. 47—52.

8. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2013 году. — Н. Новгород: ИП Кузнецов Н. В., 2014. — 152 с.
9. Нивин В. А. О возможных газогеохимических и газодинамических критериях оценки тектонофизического состояния локальных участков изверженных горных пород // Докл. АН СССР. — 1989. — Т. 308, № 6. — С. 1453—1457.
10. Нивин В. А. Основные принципы и меры газобезопасного ведения подземных горных работ на рудниках ПО «Апатит» // Гор. журн. — 1991. — № 8. — С. 34—36.
11. Нивин В. А. Газовые компоненты в магматических породах: геохимические, минерагенические и экологические аспекты и следствия: Автореф. ... д-ра геол.-минер. наук / ГЕОХИ РАН. — М., 2013. — 51 с.
12. Николаев И. Н., Литвинов А. В., Емелин Е. В. Механизм чувствительности МДП-сенсоров к концентрациям газов // Датчики и системы. — 2006. — № 7. — С. 66—73.
13. Сайт компании ООО «ЭйСиЭс» («Advanced Complex Systems») // <http://www.acs-spb.ru>.
14. 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, 31 марта — 3 апреля 2010 г., Архангельск. — [Б. м.], 2011. — С. 117—136.
15. Степаненко В. М. Моделирование и мониторинг парниковых газов в зоне вечной мерзлоты: [Доклад] // Математическое моделирование геофизических процессов: прямые и обратные задачи [Семинар] / НИВЦ МГУ. — М., 14 апр. 2011. — 32 с.
16. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. — М.: ООО «Геоинформ-центр», 2002. — 250 с.
17. Сывороткин В. Л. 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.
18. Тимашев С. Ф., Нивин В. А., Сывороткин В. Л., Поляков Ю. С. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе динамики выделения водорода в Хибинском и Ловозерском массивах (Нольский полуостров) // Динамические явления в сложных системах. — Казань: МОИНРТ, 2011. — С. 263—278.
19. Хитаров Н. И., Кравцов А. И., Войтов Г. И. и др. Газы свободных выделений Хибинского массива // Совет. геология. — 1979. — № 2. — С. 62—73.
20. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2013 год / Г. М. Черногаева, Ю. В. Пешков, М. Г. Котлякова, В. Д. Смирнов (ред.). — М.: РОСГИДРОМЕТ, 2014. — 228 с.
21. Шахова Н. Е. Метан в морях Восточной Арктики: Автореф. ... д-ра геол.-минерал. наук / Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН. — М., 2010. — 53 с.
22. Ahalya G., Suresh Babu P., Prabhakar Rao P. Development of coal mine safety system using wireless sensor networks // Intern. J. of Engineering Science & Advanced Technology. — 2013. — Vol. 3, iss. 3. — P. 74—78.
23. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey // Computer Networks. — 2002. — Vol. 38. — P. 393—422.
24. Baronti P., Pillai P., Chook V. W. C. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards // Computer Communications. — 2007. — Vol. 30. — P. 1655—1695.
25. Broring A., Beltrami P., Lemmens R. L. G., Jirka S. Automated Integration of Geosensors with the Sensor Web to Facilitate Flood Management // Approaches to Managing Disaster — Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts Disaster Management. — Rijeka, Croatia: InTech, 2012. — P. 66—89.
26. Collins F., Orpen D., Maher D. et al. Distributed Chemical Sensor Networks for Environmental Sensing // SENSORDEVICES 2011: The Second International Conference on Sensor Device Technologies and Applications. — [S. l.], 2011. — P. 58—64.
27. Collins F., Orpen D., McNamara E. et al. Web-Based Monitoring of Gas Emissions from Landfill Sites using Autonomous Sensing // STRIVE Report Series No.124 Environmental Protection Agency Programme 2007—2013. — [S. l.]: Dublin City Univ., 2014. — 45 p.
28. Di Martino R. M. R., Camarda M., Gurrieri S., Valenza M. Continuous monitoring of hydrogen and carbon dioxide at Mt Etna // Chemical Geology. — 2013. — Vol. 357. — P. 41—51.
29. Diamond D., Collins F., Cleary J., Zuliani C. Distributed Environmental Monitoring // Autonomous Sensor Networks. Collective Sensing Strategies for Analytical Purposes. — Vol. 13 / Ed. Daniel Filippini. — Heidelberg; New York; Dordrecht; Berlin, 2013. — P. 321—365.
30. Evans W. C., Bahr A., Martinoli A. Evaluating efficient data collection algorithms for environmental sensor networks // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2013. — Vol. 83. — P. 77—89.
31. Faber E., Moran C., Poggenburg J. et al. Continuous gas monitoring at Galeras Volcano, Colombia: first evidence // J. of Volcanology and Geothermal Research. — 2003. — 125. — P. 13—23.
32. Gibson D., MacGregor C. A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared CO2 Gas Sensor Compatible with Wireless and Portable Deployment // Sensors. — 2013. — Vol. 13. — P. 7079—7103.
33. Gungor V. C., Hancke G. P. Industrial wireless sensor networks: Applications, Protocols, and Standards. — [S. l.]: Taylor & Frances Group., CRC Press, 2013. — 359 p.
34. Hart J. K., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? // Earth Science Reviews. — 2006. — 78. — P. 177—191.

35. He Jinxin, Li J., Haowen Yan. Environmental Sensor Networks: A Review of Critical Issues // *Advances in MSEC* / D. Jin and S. Lin (eds.). — 2011. — Vol. 2; AISC. — 2012. — Vol. 129. — P.425—429.
36. Islam Md. Motaharul, Mohammad Mehedi Hassan, Ga-Won Lee, Eui-Nam Huh. A Survey on Virtualization of Wireless Sensor Networks // *Sensors*. — 2012. — Vol. 12. — P. 2175—2207.
37. Kassal P., Steinberg I. M., Steinberg M. D. Wireless smart tag with potentiometric input for ultra low-power chemical sensing // *Sensors and Actuators B: Chemical*. — 2013. — Vol. 184, № 31. — P. 254—259.
38. *Advanced Environmental Monitoring* / Y. J. Kim & U. Platt (eds.). — [S. l.]: Springer, 2007. — 437 p.
39. Guenther A. Trace gas emission measurements // *Environmental monitoring handbook* / F. F. Burden, D. Donnert, T. Godisg, I. McKelvie. — [S. l.], 2004. — P. 24.1—24.18.
40. La Spina A., Burton M., Salerno G. G. Unravelling the processes controlling gas emissions from the central and northeast craters of Mt. Etna // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. — 2010. — Vol. 198. — P. 368—376.
41. Lee K., Alrawahi A. S., Toohey D. Enabling Commodity Environmental Sensor Networks Using Multi-Attribute Combinatorial Marketplaces // 19th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2013. — [S. l.], 2013. — P. 115—120.
42. Lewicki J. L., Bergfeld D., Cardellini C. et al. Comparative soil CO<sub>2</sub> flux measurements and geostatistical estimation methods on Masaya volcano, Nicaragua / Lawrence Berkeley National Laboratory. — [S. l.], 2004. — 47 p. (<http://escholarship.org/uc/item/8tb2v75h>).
43. Mandal R., Kumar A., Kingson T. M. G. et al. Application of Programmable Logic Controller for Gases Monitoring in Underground Coal Mines // *IRACST — Engineering Science and Technology: An International J. (ESTIJ)*. — 2013. — Vol. 3, № 3. — P. 516—522.
44. Mans M.-A., Wachowicz M. GIS Design: A Review of Current Issues in Interoperability // *Geography Compass*. — 2009. — Vol. 3/3. — P. 1105—1124.
45. Mazzolai B., Mattoli V. From Sensor Networks to Autonomous Networked and Cooperating Platforms for Environmental Monitoring: Rep. project EMECAP (European Mercury Emissions from Chlor). — [S. l.], 2007. — 8 p.
46. Nittel S. A survey of geosensor networks: Advances in dynamic environmental monitoring // *Sensors*. — 2009. — Vol. 9 (7). — P. 5664—5678.
47. Nivin V. A., Belov N. I., Treloar P. J., Timofeyev V. V. Relationships between gas geochemistry and release rates and the geomechanical state of igneous rock massifs // *Tectonophysics*. — 2001. — Vol. 336, № 1—4. — P. 233—244.
48. Notsu K., Mori T. Chemical monitoring of volcanic gas using remote FT-IR spectroscopy at several active volcanoes in Japan // *Applied Geochemistry*. — 2010. — Vol. 25. — P. 505—512.
49. Rajadurai R., Tamilvanan S., Mathai G. J. Automatic Detection of Coal Mine Monitoring System using Wireless Sensor Network // *IJAIR*. — 2013. — Vol. 2, iss. 3. — P. 694—698.
50. Rundel P. W., Graham E. A., Allen M. F. et al. Environmental sensor networks in ecological research // *New Phytologist*. — 2009. — Vol. 182, № 3. — P. 589—607.
51. Shu L., Wu C., Zhang Y. et al. NetTopo: Beyond Simulator and Visualizer for Wireless Sensor Networks // *Second International Conference on Future Generation Communication and Networking*. — [S. l.], 2008. — P. 17—20.
52. Sukwon Choi, Nakyoung Kim, Hojung Cha, Rhan Ha. Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware and Software Issues // *Sensors*. — 2009. — Vol. 9. — P. 7970—7987.
53. Taheriazad L., Portillo-Quintero C., Sanchez-Azofeifa A. Application of Wireless Sensor Networks (WSNs) to Oil Sands Environmental Monitoring: Report project OSRIN / Centre for Earth Observation Sciences (CEOS), University of Alberta. Canada. — [S. l.], 2014. — 51 p. — (Rep. N. TR-48) (<http://www.handle.net/10402/era>).
54. Yang Chaowei, Raskin R., Goodchild M., Gahegan M. Geospatial Cyberinfrastructure: Past, present and future // *Computers, Environment and Urban Systems*. — 2010. — Vol. 34. — P. 264—277.
55. Zimmer M., Erzinger J. Continuous H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Rn222 and temperature measurements on Merapi Volcano, Indonesia // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. — 2003. — Vol. 125. — P. 25—38.