

УДК 504.064

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ:

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Шишкин А. В.¹, Кочетова Ж. Ю.², Великанов А. В.³, Тронин А. Л.⁴

*^{1,2,3,4} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация
E-mail: ¹zk_yva@mail.ru*

Показаны перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для определения заражения территорий аварийно химически опасными веществами, а также сложность их использования для оценки загрязнения почвы. Предложена конструкция квадрокоптера с повышенной устойчивостью при взлете-посадке, оснащенного подвижным аналитическим модулем для оценки заражения почвы. В качестве анализатора аварийно химически опасных веществ предложено использовать матрицу пьезосенсоров («электронный нос»), позволяющую идентифицировать и количественно определять различные вещества в почве без пробоотбора и пробоподготовки в присутствии сопутствующих компонентов, в широких диапазонах рабочих температур и концентраций. Разработана схема облета местности, отличающаяся от известных возможностью адаптации траектории беспилотного летательного аппарата с учетом особенностей распространения токсичных веществ в почве.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, беспилотный летательный аппарат, загрязнение почв, аварийно химически опасные вещества, пьезосенсор, электронный нос, схема облета местности.

ВВЕДЕНИЕ

Малогабаритные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные полезными нагрузками для обнаружения химических веществ, более двух десятилетий являются ценным инструментом в различных областях гражданской и военной сфер деятельности. Большинство разработок посвящено применению БПЛА для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в результате промышленных выбросов, оценки последствий природных и техногенных катастроф [1, 2, 3]. Беспилотные системы мониторинга становятся популярными в сельскохозяйственной и лесной отраслях [4].

Благодаря развитию техники, микроэлектроники, искусственного интеллекта успешно решаются такие сложные задачи, как создание трехмерных карт загрязнения воздуха с высоким пространственным разрешением; оценка опасных уровней токсичных газов в труднодоступных местах (дымоходы, вулканы); непрерывный мониторинг химического состава нижних слоев атмосферы в крупных промышленных городах; оценка состояния почв и здоровья растений [4, 5, 6].

Важнейшей областью применения БПЛА является мониторинг химически опасных объектов, которые используют в своих технологических процессах аварийно химически опасные вещества (АХОВ). Наибольшую опасность представляют аммиак, ацетонитрил, водород фтористый, водород цианистый, диметиламин, метил хлористый, метилакрилат, нитрил акриловой кислоты, оксиды

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

азота, окись этилена, сернистый ангидрид, сероводород, сероуглерод, соляная кислота, формальдегид, фосген, хлор, хлорпикрин [77]. На территории Российской Федерации расположено около 2800 предприятий химической промышленности. Эти объекты размещены по всем федеральным округам Российской Федерации, с наибольшим развитием химической отрасли в Приволжском (43,5% от общего объема производства химического комплекса РФ), Центральном (24,4%), Сибирском (11,2%), Южном (10,4%).

В последнее время возросла угроза террористических актов на химически опасных предприятиях, связанная с выбросом большого количества смертельно опасных химических соединений и переносом их атмосферным воздухом на десятки километров в течение нескольких часов [8]. Аварийно химически опасные вещества оседают на почвы, воды, могут заражать масштабные территории, в том числе селитебные и рекреационные зоны. Мониторинг объектов окружающей среды при развитии чрезвычайных ситуаций в реальном режиме времени имеет первостепенную задачу, так как от скорости и надежности получения информации зависят здоровье и жизнь людей.

В то же время при проведении военных операций (боевых действий) не принимается ни одно решение без учета химической и радиационной обстановки. Учитывая требования к современному бою, достоверная информация должна оперативно и непрерывно поступать в кратчайшие сроки для быстрого планирования. Для осуществления мероприятий химической защиты войск требуемая информация о факте применения противником химического и биологического оружия устанавливается с использованием наземных средств и методов химической разведки [9]. К основным недостаткам получения информации о заражении территорий с помощью наземных средств относятся: возможность отравления и гибели личного состава; длительное время разведки, обработки и передачи данных; ограниченные площади мониторинга, особенно в труднодоступных местах и на территориях под огневым контролем противника; наличие специализированного транспорта и специально обученного личного состава [10].

Существуют разработки комплексов целевой воздушной химической и радиационной разведки на платформе беспилотных летательных аппаратов. Самый известный из отечественных комплексов – «Пчела» (НИИ «Кулон»). Размещенные на БПЛА автономные датчики позволяют довольно точно оценивать содержание отравляющих и аварийно химически опасных веществ в воздухе [11]. Однако большинство из детектируемых химических соединений тяжелее воздуха, они скапливаются в низинах, проникают в верхние слои почвы и сохраняются в ней в течение длительного периода времени [12].

Несмотря на это, описание датчиков для дистанционного мониторинга заражения почвы практически отсутствует. Это вызвано главным образом необходимостью для большинства методов анализа предварительного пробоотбора и подготовки почвы, что в режиме реального времени не осуществимо или имеет ряд сложностей, связанных с условиями эксплуатации анализаторов.

Применение многих чувствительных датчиков (электрохимических, спектральных) в комплексе с БПЛА затруднено из-за наличия в окружающей среде разнообразных мешающих компонентов, агрессивных сред и радиации; сложных погодных условий; вибрации БПЛА; перепадов давления и температур объектов окружающей среды; изменения положения самих датчиков в пространстве. Для повышения надежности оценки химического загрязнения часто предлагается использовать комплекс из датчиков различного принципа действия или из датчиков, реагирующих на различные химические вещества, что уменьшает полезную нагрузку БПЛА, усложняет обработку и передачу информации. Из последних исследований по созданию высокоточных измерительных устройств токсичных веществ в объектах окружающей среды следует выделить работы Кучменко Т.А., Лисичкина Г.В., Власова Ю.Г., Штыкова С.Н. и др. [13, 14, 15, 16]. Из открытых источников следует, что высокоточная дистанционная оценка заражения почв в реальном режиме времени остается актуальным вопросом и требует решения.

Цель исследования — повышение эффективности проведения дистанционной химической разведки почвы в реальном режиме времени путем разработки беспилотного комплекса, оснащенного высокочувствительным датчиком на основе матрицы пьезосенсоров, и методик его применения в реальных условиях.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи: модификация промышленного БПЛА для химической разведки почвы и разработка съемного модуля для анализатора АХОВ в почвах; разработка методики идентификации и количественного определения АХОВ в почве с применением матрицы пьезосенсоров; разработка схемы облета местности при дистанционной оценке заражения почв.

КОНСТРУКЦИЯ БПЛА СО СЪЕМНЫМ АНАЛИТИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ

Современные БПЛА по конструкции бывают самолетного, вертолетного (однороторные и мультироторные) и гибридного типов. Для анализа веществ в воздухе на значительной высоте используют аппараты самолетного и гибридного типов. Они отличаются сложностью в управлении, требуют специальных знаний и навыков у оператора, наличия устройств взлета-посадки и специально оборудованных взлетно-посадочных полос.

Однороторные БПЛА схожи по конструкции с пилотируемыми вертолетами, оснащены ведущим воздушным винтом и небольшим по размеру воздушным винтом на хвосте, обеспечивающим контроль курса. Такие БПЛА, по сравнению с мультироторными, имеют более длительное время полета, могут приводиться в действие двигателями внутреннего сгорания. Однако большие размеры лопастей несущего винта не позволяют пилотирование и посадку в труднодоступных местах.

Мультироторные БПЛА просты в изготовлении и эксплуатации, экономичны. Из недостатков следует отметить ограниченное время полета, небольшие грузоподъемность и скорость. Такие БПЛА возможно использовать для проведения химической разведки грунта на ограниченных территориях с применением миниатюрных энергоэкономичных датчиков. Из всех рассмотренных моделей

**ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО
ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ**

БПЛА мультироторного типа наиболее стабильными и устойчивыми являются квадрокоптеры [17].

В качестве платформы для аналитического модуля химической разведки почвы рассмотрена линейка квадрокоптеров китайской компании DJI. Компания хорошо зарекомендовала себя на мировом рынке с 2006 г. и имеет официальные представительства в Российской Федерации. Благодаря модульному принципу конструирования целевой нагрузки БПЛА DJI получили широкое распространение в различных сферах, в том числе в точном земледелии, строительстве, картографии, геодезии, поиске и спасении, охране природы. Некоторые технические характеристики БПЛА компании DJI представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Некоторые характеристики квадрокоптеров компании DJI

Характеристика	Модель квадрокоптера				
	MATRICE 100	S900	S1000	MATRICE 300	MATRICE 600
Вес, г	2355	3300	4400	6300	9,6
Размеры, мм	806×806×253	460×450×360	460×511×305	810×670×430	620×320×505
Максимальное время полета, мин	40	18	15	55	35
Максимальная высота полета, м	120	500	500	5000	2500
Максимальная скорость горизонтального полета, м/с	22	19	19	23	18
Максимальная скорость набора высоты, м/с	5	5	5	6	5
Максимальная скорость снижения, м/с	4	4	4	5	3
Полезная нагрузка, г	1000	5000	6000	2700	6000
Температура рабочей среды, °С	-10-40	-10-40	-10-40	-20-40	-10-40
Максимальный взлетный вес, г	3600	8200	11000	-	15100
Относительная цена на текущее время	0,22	0,16	0,20	1,0	0,40

Составлено авторами с помощью поисковой системы «Яндекс».

С применением системного анализа для достижения поставленной в работе цели выбран квадрокоптер модели MATRICE 100. Аппарат оснащен набором различных портов питания и данных, что позволяет расширять его функционал, создавая приложения или программы специально для своей отрасли.

Следует отметить, что ни один из имеющихся в продаже БПЛА мультироторного типа не имеет достаточной устойчивости при посадке на твердую поверхность в условиях сильно измененного рельефа, а также в комплектацию

БПЛА не входит устройство для подвижного крепления аналитического модуля, позволяющего проводить измерения концентраций АХОВ над поверхностью почвы. Авторами запатентована конструкция устойчивых телескопических стоек БПЛА, а также устройство для спуска-подъема анализатора АХОВ (рис. 1) [18].



Рис. 1. Опытный образец используемого в работе беспилотного комплекса химической разведки грунта

Составлено авторами.

В качестве анализатора АХОВ в почвах выбрано миниатюрное устройство типа «электронный нос», включающее матрицу высокочувствительных пьезосенсоров, помещенную в открытую ячейку детектирования [19, 20]. Пьезосенсоры представляют собой тонкую пластину кварца АТ-среза с собственной частотой колебаний 10–15 МГц, на которую с двух сторон напылены металлические электроды, модифицированные пленками сорбентов. При приращении массы вещества в результате адсорбции на пленке-модификаторе происходит снижение собственной частоты колебаний кварцевой пластины на величину ΔF (Гц), пропорциональную концентрации анализируемых газов в околосенсорном пространстве (над почвами). Подобные системы успешно применяются для анализа различных природных сред и отличаются высокой чувствительностью (до 2,5 МГц/мг), быстродействием (время отклика до 5 с), точностью микровзвешивания (погрешность лучших пьезосенсоров составляет 1–2 %), надежностью, экономичностью, минимальным энерго- и ресурсопотреблением [21–23]. Также немаловажным фактором при выборе чувствительных элементов для съемного аналитического модуля БПЛА является и то, что пьезосенсоры устойчивы к вибрации, механическим воздействиям, радиации, агрессивным средам; обратимы и способны к саморегенерации в течение 1–2 мин; результаты измерений не зависят от положения пьезосенсоров в пространстве [23].

Матрицы из нескольких пьезосенсоров с неселективными разнородными чувствительными сорбционными покрытиями используют для идентификации

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

химических соединений в объектах окружающей среды, то есть выбранный анализатор универсален. С набором одних и тех же пьезосенсоров возможна идентификация и количественное определение различных химических соединений. Обработка и визуализация суммарного аналитического сигнала от нескольких пьезосенсоров проводится по различным алгоритмам в зависимости от решаемых задач [13, 19, 22]. Наибольшее распространение на сегодняшний день имеет метод нейронных сетей, подразумевающий предварительное обучение системы сенсоров по эталонным образцам анализируемого объекта [24].

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ И КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АХОВ В ПОЧВЕ

На примере определения диметиламина (ДМА) в статье представлена методика оценки загрязнения почв с применением анализатора, включающего матрицу из трех пьезосенсоров. Диметиламин — газ с резким запахом гнилой рыбы, тяжелее воздуха; относится к соединениям II класса опасности. Его используют при производстве резины, отравляющих веществ, ракетного топлива. При правильном хранении диметиламин является стабильным веществом, а в почвах (особенно во влажных) трансформируется в гептил, нитрозодиметиламин, тетраметилтетразен, диметилформамид, метилтриазол, диметилтриазол, диметилгидразон формальдегида [25]. ДМА хорошо растворим в воде (1630 г/л при 20 °С); безразмерная константа закона Генри при 20 °С для него равна $3,37 \cdot 10^{-9}$, что означает низкую летучесть токсиканта с поверхности почвы.

В качестве пленочных покрытий пьезосенсоров матрицы использовали растворы разнополярных сорбентов: полярный пчелиный клей (сенсор 1); средне полярный тритон X-100 (сенсор 2); неполярный полистирол (сенсор 3). Значительно отличающаяся природа сорбентов обеспечивает различие в величине аналитического сигнала каждого пьезосенсора (ΔF_i) и кинетике сорбции различных АХОВ ($\Delta F_i = f(\tau)$), что позволяет идентифицировать вещества с большей вероятностью [21].

Для приготовления модельных смесей паров ДМА и построения градуировочных графиков рассчитывали концентрацию паров диметиламина над стандартным 40 %-ным химически чистым раствором по закону Генри-Дальтона [26]:

$$C_{\text{газ}} = C_{\text{р-р}}/H_{\text{сс}},$$

где $C_{\text{газ}}$ и $C_{\text{р-р}}$ — концентрации ДМА в газовой и водной фазах ($\text{мг}/\text{м}^3$); $H_{\text{сс}} = 2,97 \cdot 10^{10}$ — безразмерная растворимость Генри — обратная величина константе Генри.

Вычисленная равновесная концентрация ДМА в газовой фазе 40 %-ного раствора составила $137,9 \text{ мг}/\text{м}^3$. Насыщенные пары диметиламина разбавляли в генераторе модельных газовых смесей до заданной концентрации [27].

Модифицированные пьезосенсоры закрепляли в закрытой ячейке детектирования, в которую инжектировали шприцем пары ДМА с заданными

концентрациями в интервале $C_{\text{газ}}=10\text{--}105 \text{ мг/м}^3$. Считывали снижение частоты колебаний каждого пьезосенсора с шагом $\tau=15 \text{ с}$, через 1 мин от начала сорбции фиксировали аналитический сигнал ΔF_i . Полученные градуировочные графики представлены на рисунке 2.

Наибольшей чувствительностью к парам ДМА характеризуется пьезосенсор (1) с пленочным покрытием на основе тритона X-100. Этот пьезосенсор использовали для количественно определения паров ДМА над поверхностью почвы, при этом учитывали температурный коэффициент, установленный для диметиламина экспериментально путем построения изостеры сорбции ($K_{\text{иср}}=26 \text{ Гц/5 } ^\circ\text{C}$).

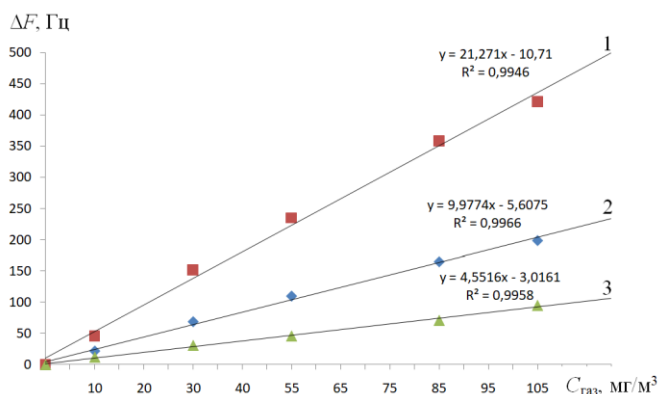


Рис. 2. Зависимость аналитических сигналов пьезосенсоров, модифицированных пчелиным клеем (1), тритоном X-100 (2) полистиролом (3) от концентрации диметиламина в газовой фазе (температура воздуха $22\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Составлено авторами.

Для идентификации АХОВ формировали суммарный аналитический сигнал от трех пьезосенсоров путем построения «отпечатка запаха» — лепестковой диаграммы в программе Excel [21]. Для этого по часовой стрелке на радиальных осях диаграммы поочередно откладывали аналитические сигналы каждого пьезосенсора с шагом $\tau=15 \text{ с}$. Такой подход позволяет учесть не только интенсивность сорбции аналита на сорбентах различной природы, но и учесть особенности кинетики сорбции, что является качественной характеристикой метода. «Отпечатки запаха» различных газов уникальны, как отпечатки пальцев. Примеры лепестковых диаграмм, полученных для различных газов, представлены на рисунке 3. При изменении концентрации анализируемого газа изменяется площадь диаграммы, а геометрия остается прежней. При наличии сопутствующих компонентов геометрия диаграммы изменяется и тем значительно, чем выше содержание мешающего вещества в смеси газов (рис. 4).

Для снижения влияния сопутствующих компонентов на надежность идентификации АХОВ в почве проводили обучение искусственного интеллекта на базе общедоступной программы Loginot по базам данных, полученных для различных условий сорбции ДМА. Для обучения использовали 1225 образцов с

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

различными концентрациями ДМА, в присутствии сопутствующих газов в различных соотношениях, в интервале температур воздуха от 5 до 32 °С. Вероятность правильной идентификация ДМА в почвах при наличии сопутствующих компонентов при их содержании, не превышающих концентрацию анализируемых АХОВ, в заданных температурных условиях составляет 99,8%.

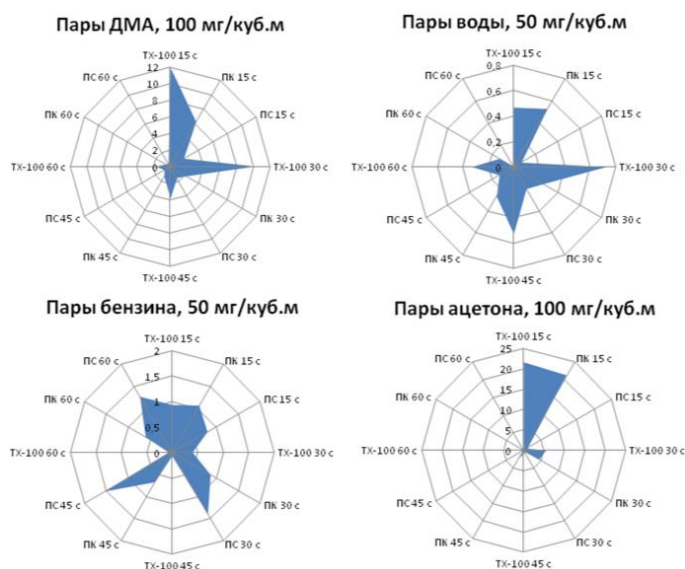


Рис. 3. «Отпечатки запахов» различных соединений, полученные с применением трехсенсорной матрицы (температура воздуха $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$)

Составлено авторами.

СПОСОБ ОБЛЕТА БПЛА МЕСТНОСТИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ПОЧВ

Для ведения воздушной разведки местности при мониторинге воздуха применяют известные схемы облета территории (режимы «прочесывания»; «разворота»; «змейки» и др.) [28]. Известные траектории БПЛА возможно использовать и при анализе заражения почвы. Схема мониторинга при этом будет отличаться тем, что в точках отбора проб производится посадка БПЛА; открытая ячейка детектирования автоматически устанавливается на грунт; в течение 1 минуты производится считывание аналитических сигналов пьезосенсоров, которые в режиме реального времени передаются на компьютер оператора, где обрабатываются с помощью специальных программ с целью идентификации опасного вещества (если оно не известно априори) и установления его концентрации над поверхностью почвы. После проведения измерения открытая ячейка детектирования автоматически поднимается с применением специального устройства. В течение времени набора высоты БПЛА и его перелета к следующей

контрольной точке (1–2 мин) происходит регенерация сорбционных пленочных покрытий, то есть пьезосенсоры готовы к повторному использованию.

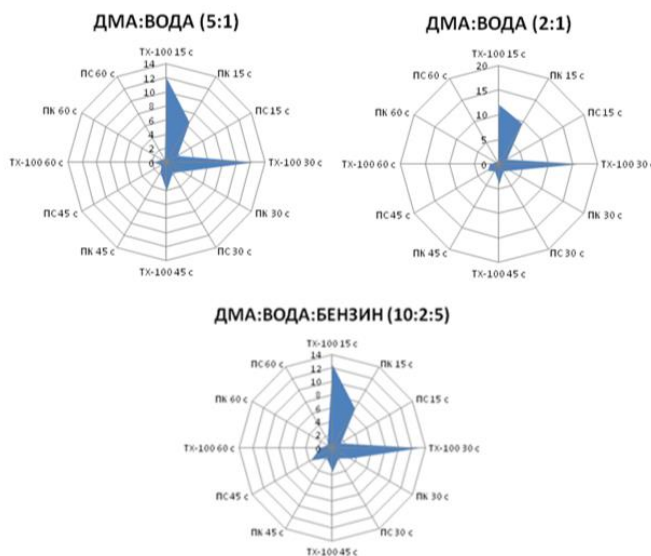


Рис. 4. «Отпечатки запахов» смесей газов (температура воздуха $20\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)
Составлено авторами.

Однако известные способы облета территорий не учитывают характер распространения АХОВ в депонирующих средах, который зависит от многих факторов, в том числе от причины заражения территории (осаждение облака АХОВ, утечка или разлив из цистерны для хранения АХОВ или трубопровода, гильотинное разрушение цистерны или трубопровода в результате взрыва); интенсивности и объема выброса АХОВ; рельефа местности; типа и уплотнения депонирующей среды; физико-химических свойств АХОВ; метеорологических условий [29].

В депонирующих средах АХОВ в зависимости от своих физико-химических свойств, разлитого количества и условий окружающей среды могут оставаться в неизменном виде от нескольких часов до нескольких недель, месяцев и даже лет [12]. При эмиссии АХОВ из депонирующих сред происходит вторичное заражение территории. Прогнозировать характер распространения пятна АХОВ в депонирующих средах и распространение вторичного облака загрязнения при большом сочетании случайных факторов невозможно. Поэтому предлагается специальная схема мониторинга грунтов с применением БПЛА, которая представлена на рисунке 5 а.

На первом этапе измерение концентраций АХОВ в почве необходимо проводить по спирали от очага химической аварии на небольшом удалении от источника (5–10 м), что обеспечивает наглядность формирования основного направления распространения пятна. На втором этапе шаг и направление выбора точек измерения концентрации АХОВ адаптируют в режиме реального времени.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Адаптация зависит от соотношения текущей концентрации АХОВ к нормативу в каждом предыдущем витке спирали от очага химического загрязнения. Если текущая концентрация в точке по выбранному направлению не превышает установленный норматив, то по этому направлению прекращают вести анализ и перестраивают траекторию движения роботизированного комплекса.

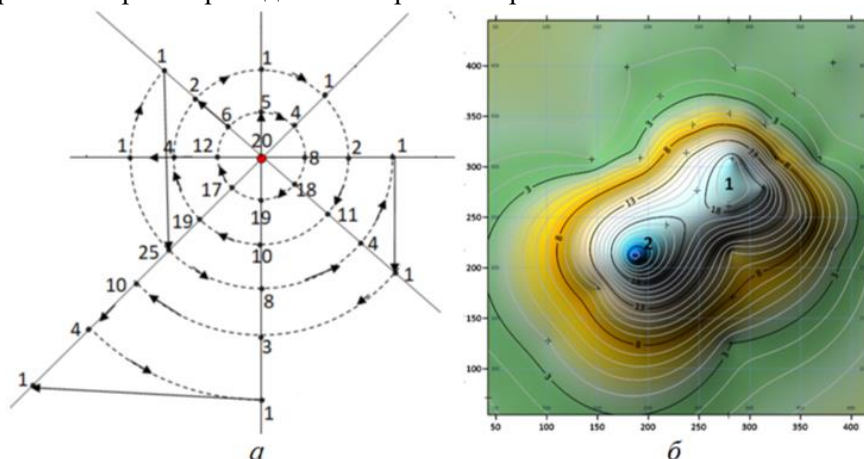


Рис. 5. Схема облета БПЛА местности для мониторинга загрязнения почвы в адаптированном режиме (а) и карта загрязнения почв (б). Стрелками показано направление движения БПЛА; точками — места пробоотбора; цифрами — кратность превышения нормативов содержания АХОВ

Составлено авторами.

Такой способ мониторинга почв обеспечивает точность оконтуривания пятна АХОВ при минимальном числе точек анализа. Расстояние между точками измерений возможно варьировать в режиме реального времени. При мало изменяющихся концентрациях расстояние между точками следует увеличить без потери информации и снижения точности мониторинга. После обработки информации строится концентрационная карта распространения пятна АХОВ в депонирующих средах (например, в программе Surfer), по которой с учетом изменяющихся метеорологических условий возможно более точное прогнозирование образования над пятном АХОВ вторичного облака (цифра 2 на рисунке 5 б) и переноса его в воздухе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделан краткий анализ применения современных беспилотных комплексов для дистанционного мониторинга загрязнения объектов окружающей среды в гражданских и военных целях. Их главные отличия от наземных средств — скорость получения информации и безопасность персонала (личного состава). Большинство существующих комплексов химической разведки оснащены датчиками для обнаружения аварийно химически опасных (отравляющих) веществ в атмосферном воздухе. Для решения проблемы дистанционного мониторинга

заражения почв предложен квадрокоптер с повышенной устойчивостью при взлете-посадке, оснащенный подвижным аналитическим модулем — анализатором АХОВ на основе матрицы пьезосенсоров («электронный нос»).

Разработанная методика позволяет анализировать загрязнение почв АХОВ в широком интервале температур (5–32 °С); концентраций (10–105 мг/м³ над почвой); в присутствии сопутствующих соединений (паров воды, бензина, спирта). Методика универсальна, то есть с использованием набора одних и тех же пьезосенсоров возможно обнаружение различных химических соединений над почвами. Время измерения в одной точке (без учета взлета-посадки квадрокоптера) составляет 1 мин. Регенерация пьезосенсоров происходит самопроизвольно воздухом через открытое дно ячейки детектирования при перелете БПЛА к следующей контрольной точке. Представленная методика не требует пробоотбора и пробоподготовки почвы; специальной аппаратуры для регенерации чувствительных элементов анализатора. Информация о загрязнении почв передается в режиме реального времени на пульт оператора.

Схемы облета местности зависят от многих факторов и поставленных задач. Для оценки заражения почвы АХОВ следует учитывать характер, объемы и причины их поступления в окружающую среду, климатические условия, рельеф. Предложенная в работе схема облета местности с адаптацией маршрута в зависимости от степени загрязнения почв в контрольных точках позволяет сократить время облета без снижения точности и надежности мониторинга загрязнения почвы.

Список литературы

1. Осанов В.А., Шурихин А.А., Кондратьев С.М., Михаленко Ю.А., Коняева О.С. Разработка автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха с использованием беспилотного летательного аппарата // Т-Сотт-Телекоммуникации и Транспорт. 2019. № 13(5). С. 28–34.
2. Пат. № 2645249 Российская Федерация, МКП G01W 1/08(2006.01). Способ мониторинга окружающей среды и беспилотный аппарат для использования в данном способе / Дудкин А. Ф., Калинин С.Ю., Мовляев А.С., заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы». № 2016133716; заявл. 17.08.2016; опубл. 19.02.2018. 6 с.
3. Соловьев М.О. Исследование возможностей беспилотных летательных аппаратов в решении проблем утечек газа и нефти // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. №2-2(77). С. 41–45.
4. Башилов А.М., Королев В.А. Автономные беспилотные летательные аппараты в точных системах агропроизводства // Вестник аграрной науки Дона. 2018. Т. 3. № 43. С. 76–82.
5. Данеев А. В., Дмитриева Л. Ю., Плеханова О. С. Трехмерная геопространственная визуализация загрязнения воздушной среды региона // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №3. С. 16–20.
6. Петелева Е.Е. Использование средств дистанционного зондирования для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Вестник магистратуры. 2016. № 6-1 (57). С. 7–9.
7. Шевченко А.В. Стратегия реализации Концепции радиационной, химической и биологической защиты населения (часть первая) // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т. 13. № 2 (48). С. 66–72.
8. Никитенко Ю.В., Богданов А.П. Основные направления снижения террористической угрозы на химически опасных объектах // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1. С. 378–382.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

9. Бакин Э.Н., Петрикин А.Н. Колесов Д.Г. Применение беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа при организации воздушной радиационной и химической разведки // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 3. С. 7–14.
10. Асеев В.А., Бакин Э.Н., Смурыгин А.В. Способы выявления радиационной, химической и биологической обстановки расчетами комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 39–45.
11. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). С. 39–46.
12. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Пантелеев Д.А. Экология почв военных полигонов. Воронеж: Научная книга, 2023. 184 с.
13. Кучменко Т.А., Умарханов Р.У., Кочетова Ж.Ю., Бельских Н.В. Разработка датчика, газоанализатора и детектора аммиака на основе пьезосенсора // Журнал аналитической химии. 2012. Т. 67. № 11. С. 1032.
14. Кулакова И.И., Лисичкин Г.В. Перспективы применения графеновых наноматериалов: сорбенты, мембраны, газовые сенсоры // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. № 9. С. 1104–1121.
15. Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Мультисенсорные системы типа электронный язык – новые возможности создания и применения химических сенсоров // Успехи химии. 2006. Т. 75. №2. С. 141–150.
16. Штыков С.Н., Русанова Т.Ю. Наноматериалы и нанотехнологии в химических и биохимических сенсорах: возможности и области применения // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. №2. С. 92–100.
17. Великанов А.В., Шишкин А.В., Кочетова Ж.Ю., Осипов В.С., Дьякова Н.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для проведения химической разведки грунта на зараженных территориях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 154–163.
18. Пат. № 2766308 С1 Российской Федерации, МПК В64С 39/02. Беспилотный комплекс химической разведки грунта / Великанов А.В., Кочетова Ж.Ю., Павлович А.В., Григорян А.С., Григорьев Д.С., Шишкин А.В., заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». № 2020129280; заявл. 03.09.2020; опубл. 14.03.2020.
19. Кучменко Т.А., Кочетова Ж.Ю., Федорова Е.В., Бондарева Л.П., Шлык Ю.К., Коренман Я.И. Применение матрицы пьезосорбционных датчиков для анализа газовых этанолсодержащих смесей // Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76. №5. С. 764–770.
20. Пат. № 2302627 С1 Российской Федерации, МПК G01N 27/12. Газоанализатор с открытым входом на основе пьезосенсоров / Кучменко Т.А., Кочетова Ж.Ю., Силина Ю.Е., заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Сенсорные технологии». № 2006102742/28; заявл. 31.01.2006; опубл. 10.07.2007.
21. Маслова Н.В., Кочетова Ж.Ю. Комплексный экспресс анализ загрязнения вод // Региональные геосистемы. 2021. Т. 45. № 3. С. 382–392.
22. Кочетова Ж.Ю., Внукова С.В., Дубачева А.В., Кучменко Т.А. Пьезосорбционный экспресс-анализ загрязнения почв бензином // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. Т. 6(72). № 3. С. 292–302.
23. Проблемы аналитической химии. Т. 14: Химические сенсоры / под ред. Ю.Г. Власова. М.: Наука, 2011. 399 с.
24. Шапкин С.Ю., Кочетова Ж.Ю., Кучменко Т.А. Применение многослойной нейронной сети для анализа бинарных газовых смесей // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5-1(16-1). С. 305–309.
25. Товасаров А.Д. К вопросу устойчивости диметиламина в почве // Известия научно-технического общества «КАХАК». 2012. № 3(37). С. 116–118.
26. Sander R. Compilation of constants of Henry's Law (version 4.0) for water as a solvent // Atmosphere. Chemistry. Physics. 2015. Vol. 15. No. 8. PP. 4399–4981.
27. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Кучменко Т.А., Мишина А.А., Щербак К.П. Определение влажности воздуха в широком диапазоне температур и концентраций // Аналитика и контроль. 2012. Т. 16. № 1. С. 53–60.

28. Временное наставление по применению комплексов с БЛА в ВС РФ. Москва: МО РФ, 2013. 11 с.
29. Зайцев А.Н., Исмаилов Ш.Н. Технологии ведения работ по локализации и ликвидации источников химического заражения при авариях с выбросами аварийно химически опасных веществ в чрезвычайных ситуациях различного типа // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1. С. 220–224.

REMOTE MONITORING OF SOIL CONTAMINATION WITH HAZARDOUS CHEMICALS: PROBLEMS AND SOLUTIONS

Shishkin A. V.¹, Kochetova Zh. Yu.², Velikanov A. V.³, Tronin A. L.⁴

*^{1,2,3,4} Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin
Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation
E-mail: ¹zk_yva@mail.ru*

A brief analysis of the use of modern unmanned systems for remote monitoring of environmental pollution for civil and military purposes is made. Their main differences from ground-based chemical reconnaissance equipment are the speed of obtaining information and the safety of personnel (personnel). Most of the existing chemical reconnaissance complexes are equipped with sensors for detecting emergency chemically dangerous (toxic) substances in the atmospheric air. To solve the problem of remote monitoring of soil contamination, a quadcopter with increased stability during takeoff and landing is proposed, equipped with a mobile analytical module — analyzer of emergency chemically hazardous substances based on a piezosensor matrix («electronic nose»). Piezosensors differ from well-known soil pollutant analyzers in their high sensitivity, miniaturization, and economical energy consumption. They are resistant to vibration and mechanical influences, radiation, aggressive environments, and are reversible.

The developed technique using an «electronic nose» allows analyzing soil contamination with hazardous chemicals in a wide range of temperatures (5–32 °C); concentrations (10–105 mg/m³ above the soil); in the presence of concomitant compounds (water vapor, gasoline, alcohol). The technique is universal, that is, using a set of the same piezosensors, it is possible to detect various chemical compounds over soils. The measurement time at one point (excluding take-off and landing of the quadcopter) is 1 min. The regeneration of piezosensors occurs spontaneously by air through the open bottom of the detection cell during the flight of the UAV to the next control point. Thus, the presented technique does not require sampling and sample preparation of the soil; special equipment for the regeneration of the sensitive elements of the analyzer. Information about soil pollution is transmitted in real time to the operator's console.

Over flight patterns depend on many factors and set goals. To assess soil contamination with hazardous chemicals, it is necessary to take into account the nature, volume and causes of their entry into the environment, climatic conditions, and relief. The proposed scheme of overflying the area (in the «spiral» mode) with route adaptation depending on the degree of soil pollution at control points allows you to reduce the monitoring time without reducing the accuracy and reliability of monitoring soil pollution.

Keywords: remote monitoring, unmanned aerial vehicle, soil pollution, emergency chemically hazardous substances, piezosensor, electronic nose, terrain flyby scheme.

References

1. Osanov V.A., Shchurihin A.A., Kondrat'ev S.M., Mihalenko Yu.A., Konyaeva O.S. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy monitoringa atmosfernogo vozduha s ispol'zovaniem bespilotnogo letatel'nogo apparata (Development of an automated atmospheric air monitoring system using an unmanned aerial vehicle). *T-Comm-Telekommunikacii i Transport*, 2019, no. 13(5), pp. 28–34 (in Russian).
2. Patent no. 2645249 Russian Federation, MCP G01W 1/08(2006.01). Sposob monitoringa okruzhayushchej sredy i bespilotnyj apparat dlya ispol'zovaniya v danom sposobe (A method for monitoring the environment and an unmanned vehicle for use in this method) / Dudkin A.F., Kalinin S.Yu., Movlyayev A.S., applicant and patent holder of JSC Russian Space Systems. no. 2016133716; application dated 08/17/2016; publ. 02/19/2018, 6 p. (in Russian).
3. Solov'ev M.O. Issledovanie vozmozhnostej bespilotnyh letatel'nyh apparatov v reshenii problem utechek gaza i nefi (Investigation of the capabilities of unmanned aerial vehicles in solving problems of gas and oil leaks). *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, 2023, no. 2-2(77), pp. 41–45 (in Russian).
4. Bashilov A.M., Korolev V.A. Avtonomnye bespilotnye letatel'nye apparaty v tochnyh sistemah agroprodukcii (Autonomous unmanned aerial vehicles in precision agricultural production systems). *Vestnik agrarnoj nauki Dona*, 2018, vol. 3, no. 43, pp. 76–82 (in Russian).
5. Daneev A.V., Dmitrieva L.Yu., Plekhanova O.S. Trekhmernaya geoprostranstvennaya vizualizaciya zagryazneniya vozduшной sredy regiona (Three-dimensional spatial visualization of air pollution in the region). *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 3, pp. 16–20 (in Russian).
6. Peteleva E.E. Ispol'zovanie sredstv distancionnogo zondirovaniya dlya monitoringa zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya (The use of remote sensing tools for monitoring agricultural land). *Vestnik magistratury*, 2016, no. 6-1 (57), pp. 7–9 (in Russian).
7. Shevchenko A.V. Strategiya realizacii Konceptii radiacionnoj, himicheskoj i biologicheskoj zashchity naseleniya (chast' pervaya) (Strategy for the implementation of the Concept of radiation, chemical and biological protection of the population (part one)). *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*, 2016, vol. 13, no. 2(48), pp. 66–72 (in Russian).
8. Nikitenko Yu.V., Bogdanov A.P. Osnovnye napravleniya snizheniya terroristicheskoj ugrozy na himicheski opasnyh ob'ektah (The main directions of reducing the terrorist threat at chemically hazardous facilities). *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij*, 2015, no. 1, pp. 378–382 (in Russian).
9. Bakin E.N., Petrikin A.N., Kolesov D.G. Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov vertoletnogo tipa pri organizacii vozduшной radiacionnoj i himicheskoj razvedki (The use of helicopter-type unmanned aerial vehicles in the organization of aerial radiation and chemical reconnaissance). *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2017, no. 3, pp. 7–14 (in Russian).
10. Aseev V.A., Bakin E.N., Smurygin A.V. Sposoby vyyavleniya radiacionnoj, himicheskoj i biologicheskoj obstanovki raschetami kompleksov s bespilotnymi letatel'nymi apparatami (Methods of detecting radiation, chemical and biological conditions by calculations of complexes with unmanned aerial vehicles). *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2020, no. 13, pp. 39–45 (in Russian).
11. Poltavskij A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. Mnogofunkcional'nye komplekсы bespilotnyh letatel'nyh apparatov: razvitie v sisteme vooruzheniya (Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles: development in the armament system). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem*, 2016, no. 1(13), pp. 39–46 (in Russian).
12. Kochetova Zh.Yu., Bazarskij O.V., Panteleev D.A. Ekologiya pochv voennyh poligonov (Soil ecology of military ranges). *Voronezh: Nauchnaya kniga*, 2023, 184 p. (in Russian).
13. Kuchmenko T.A., Umarhanov R.U., Kochetova Zh.Yu., Bel'skih N.V. Razrabotka datchika, gazoanalizatora i detektora ammiaka na osnove p'ezosensora (Development of a sensor, a gas analyzer and an ammonia detector based on a piezosensor). *Zhurnal analiticheskoj himii*, 2012, vol. 67, no. 11, pp. 1032 (in Russian).
14. Kulakova I.I., Lisichkin G.V. Perspektivy primeneniya grafenovyh nanomaterialov: sorbenty, membrany, gazovye sensory (Prospects for the use of graphene nanomaterials: sorbents, membranes, gas sensors). *Zhurnal prikladnoj himii*, 2021, vol. 94, no. 9, pp. 1104–1121 (in Russian).

15. Vlasov Yu.G., Legin A.V., Rudnickaya A.M. Mul'tisensornye sistemy tipa elektronnyy yazyk – novye vozmozhnosti sozdaniya i primeneniya himicheskikh sensorov (Multisensory systems of the electronic language type – new possibilities for the creation and application of chemical sensors). *Uspekhi himii*, 2006, vol. 75, no. 2, pp. 141–150 (in Russian).
16. Shtykov S.N., Rusanova T.Yu. Nanomaterialy i nanotekhnologii v himicheskikh i biohimicheskikh sensorah: vozmozhnosti i oblasti primeneniya (Nanomaterials and nanotechnology in chemical and biochemical sensors: possibilities and applications). *Rossiiskij himicheskij zhurnal*, 2008, vol. 52, no. 2, pp. 92–100 (in Russian).
17. Velikanov A.V., Shishkin A.V., Kochetova Zh.Yu., Osipov V.S., D'yakova N. A. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya provedeniya himicheskoy razvedki grunta na zarazhennykh territoriyah (The use of unmanned aerial vehicles for conducting chemical reconnaissance of soil in infected territories). *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2022, no. 40, pp. 154–163 (in Russian).
18. Patent no. 2766308 C1 of the Russian Federation, IPC B64C 39/02. Bespilotnyy kompleks himicheskoy razvedki grunta (Unmanned complex of chemical soil exploration) / Velikanov A.V., Kochetova Zh. Yu., Pavlovich A.V., Grigoryan A. S., Grigoriev D. S., Shishkin A.V., applicant and patent holder of the VUNC Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», no. 2020129280; application 03.09.2020; publ. 03/14/2020 (in Russian).
19. Kuchmenko T.A., Kochetova Zh.Yu., Fedorova E.V., Bondareva L.P., Shlyk Yu.K., Korenman Ya.I. Primenenie matricy p'ezosorbtsionnykh datchikov dlya analiza gazovykh etanolsoderzhashchih smesey (Application of a piezosorption sensor matrix for the analysis of ethanol-containing gas mixtures). *Zhurnal prikladnoy himii*, 2003, vol. 76, no. 5, pp. 764–770 (in Russian).
20. Patent no. 2302627 C1 of the Russian Federation, IPC G01N 27/12. Gazoanalizator s otkrytym vhomom na osnove p'ezosensorov (A gas analyzer with an open entrance based on piezosensors) / Kuchmenko T. A., Kochetova Zh. Yu., Silina Yu. E., applicant and patent holder Limited Liability Company «Sensor Technologies», no. 2006102742/28; application 31.01.2006; publ. 10.07.2007 (in Russian).
21. Maslova N.V., Kochetova Zh.Yu. Kompleksnyy ekspress analiz zagryazneniya vod (Complex express analysis of water pollution). *Regional'nye geosistemy*, 2021, vol. 45, no. 3, pp. 382–392 (in Russian).
22. Kochetova Zh.Yu., Vnukova S.V., Dubacheva A.V., Kuchmenko T.A. P'ezosorbtsionnyy ekspress-analiz zagryazneniya pochv benzinom (Piezosorption express analysis of soil pollution with gasoline). *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biologiya. Himiya*, 2020, vol. 6(72), no. 3, pp. 292–302 (in Russian).
23. Problemy analiticheskoy himii (Problems of analytical chemistry). Vol. 14: Himicheskie sensory (Chemical sensors) / edited by Yu. G. Vlasov, Moscow: Nauka, 2011, 399 p. (in Russian).
24. Shapkin S.Yu., Kochetova Zh.Yu., Kuchmenko T.A. Primenenie mnogoslojnoj nejronnoj seti dlya analiza binarnykh gazovykh smesey (Application of a multilayer neural network for the analysis of binary gas mixtures). *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2015, vol. 3, no. 5-1(16-1), pp. 305–309 (in Russian).
25. Tovasarov A.D. K voprosu ustojchivosti dimetilamina v pochve (On the issue of dimethylamine stability in soil). *Izvestiya nauchno-tekhnicheskogo obshchestva «KAHAK»*, 2012, no. 3(37), pp. 116–118 (in Russian).
26. Sander R. Compilation of constants of Henry's Law (version 4.0) for water as a solvent. *Atmosphere. Chemistry. Physics*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 4399–4981.
27. Kochetova Zh.Yu., Bazarskij O.V., Kuchmenko T.A., Mishina A.A., Shcherbak K.P. Opredelenie vlazhnosti vozduha v shirokom diapazone temperatur i koncentracij (Determination of air humidity in a wide range of temperatures and concentrations). *Analitika i kontrol'*, 2012, vol. 16, no 1, pp. 53–60 (in Russian).
28. Vremennoe nastavlenie po primeneniyu kompleksov s BLA v VS RF (Temporary instruction on the use of complexes with UAVs in the Armed Forces of the Russian Federation). Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation, 2013, 11 p. (in Russian).
29. Zajcev A.N., Ismailov Sh.N. Tekhnologii vedeniya rabot po lokalizacii i likvidacii istochnikov himicheskogo zarazheniya pri avariayah s vybrosami avarijno himicheskimi opasnykh veshchestv v chrezvychajnykh situatsiyah razlichnogo tipa (Technologies for conducting work on localization and elimination of sources of chemical contamination in accidents with emissions of emergency chemically

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАЖЕНИЯ ПОЧВЫ АВАРИЙНО
ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

hazardous substances in emergency situations of various types). Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij, 2015, no. 1, pp. 220–224.

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.