

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-144-155

УДК 53.082.79

Сбор и обработка экологической информации в районах нефтегазодобычи и решение других прикладных задач методами активного поиска (обзорная статья)

Игорь Владимирович Свитнев¹, Александр Фотеевич Найданов^{2✉},
Алексей Владимирович Вилков³, Дмитрий Александрович Соколов⁴,
Михаил Юрьевич Лебедев⁵, Елена Александровна Харитонова⁶,
Людмила Анатольевна Лукьянова⁷

^{1,2,3,4,5} Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

^{6,7} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

¹ isvitnev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>

² naydanov@bk.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-4242-1700>

³ Leha_kostroma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9300-3547>

⁴ falcon.85@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0111-403X>

⁵ Lebedev.m1hall@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8876-7846>

⁶ Xaritonova_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>

⁷ lalukianova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>

Аннотация

Введение. Исследованы способы мониторинга экологической обстановки, проблемы решения смежных прикладных эколого-ресурсных задач в труднодоступных районах нефтегазодобычи, а также в других отраслях народного хозяйства с использованием беспилотных летательных средств. Рассмотрены методы исследования типов и толщин слоев подстилающей поверхности путем их зондирования электромагнитными импульсами радиочастотного диапазона и гамма-излучения. **Метод.** На основе существующих теоретических зависимостей взаимодействия электромагнитного излучения с поверхностью Земли представлены диаграммы прохождения электромагнитных волн дециметрового и сантиметрового диапазонов через различные структуры ландшафта (снег-лед-вода-мерзлая почва). **Основные результаты.** Показано, что использование гамма-излучения позволяет решить проблему определения эффективной высоты летательного аппарата при экологическом мониторинге за счет большой энергии фотонного излучения и альбеда от различных поверхностей, в том числе от снежного покрова. Приведена методика расчета содержания загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его достоверного обнаружения. Отмечено, что на достоверность показаний измерительных средств значительное влияние оказывает их геометрическое расположение на транспортной платформе. Показано, что предложенное решение целесообразно реализовать с использованием двух беспилотных летательных аппаратов или малоразмерного беспилотного дирижабля. На основании сделанного обзора предложен состав технических средств комплекса распознавания типов и толщин слоев загрязнений подстилающей поверхности. Приведена возможная методика оценивания экологической обстановки. **Обсуждение.** Результаты работы могут найти применение при проведении экологической разведки, при транспортировке нефтяных и газовых ресурсов в условиях затруднения доступа к ним. Расширены возможности решения подобных военно-прикладных и инженерно-строительных задач. Впервые предложено совместное использование электромагнитных волн радиочастотного диапазона и гамма-излучения. Электромагнитное излучение радиочастотного диапазона позволяет исследовать структуру ландшафта. Гамма-излучение по обратному рассеянному ионизирующему излучению дает возможность определить тип загрязнителя и обеспечить высокую точность измерения расстояния от модуля до верхнего слоя подстилающей поверхности.

Ключевые слова

гамма-излучение, доверительный интервал, загрязнитель, окружающая среда, определение высоты, радиопульс, толщина слоя, экологическая обстановка, электромагнитные волны

© Свитнев И.В., Найданов А.Ф., Вилков А.В., Соколов Д.А., Лебедев М.Ю., Харитонова Е.А., Лукьянова Л.А., 2024

Ссылка для цитирования: Свитнев И.В., Найданов А.Ф., Вилков А.В., Соколов Д.А., Лебедев М.Ю., Харитонов Е.А., Лукьянова Л.А. Сбор и обработка экологической информации в районах нефтегазодобычи и решение других прикладных задач методами активного поиска (обзорная статья) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 1. С. 144–155. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-144-155

Collection and processing of environmental information in oil and gas production areas and solving other applied problems using active search methods (Review article)

Igor V. Svitnev¹, Alexander F. Naydanov²✉, Alexey V. Vilkov³, Dmitry A. Sokolov⁴,
Mikhail Yu. Lebedev⁵, Elena A. Kharitonova⁶, Lyudmila A. Lukyanova⁷

^{1,2,3,4,5} Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

^{6,7} St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

¹ isvitnev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>

² naydanov@bk.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-4242-1700>

³ Leha_kostroma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9300-3547>

⁴ falcon.85@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0111-403X>

⁵ Lebedev.m1hall@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8876-7846>

⁶ Xaritonova_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>

⁷ lalukianova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>

Abstract

The methods of monitoring the environmental situation as well as the problems of solving related applied environmental and resource problems in hard-to-reach areas of oil and gas production and also in other sectors of the national economy using unmanned aerial vehicles, are investigated. The methods of studying the types and thicknesses of the layers of the underlying surface by probing them with electromagnetic pulses of the radiofrequency range and gamma radiation are considered. Based on the existing theoretical dependencies of the interaction of electromagnetic radiation with the Earth's surface, diagrams of the passage of electromagnetic waves in the decimeter and centimeter ranges through various landscape structures (snow-ice-water-frozen soil) are presented. It is shown that the use of gamma radiation makes it possible to solve the problem of determining the effective altitude of an aircraft during environmental monitoring due to the high energy of photon radiation and albedo from various surfaces including snow cover. A method for calculating the pollutant content on the underlying surface with a given probability of its reliable detection is presented. It is noted that the reliability of the readings of measuring instruments is significantly influenced by their geometric location on the transport platform. It is shown that the proposed solution is advisable to implement using two unmanned aerial vehicles or as small-sized unmanned airship. Based on the review, the composition of the technical means of the complex for recognizing the types and thicknesses of layers of contamination of the underlying surface is proposed. A possible methodology for assessing the environmental situation is presented. The results of the work can be used in conducting environmental exploration of infrastructure used for transporting oil and gas resources in conditions of difficult access to it as well as for solving similar military-applied and engineering-construction tasks. At the same time, for the first time, the joint use of the radio frequency range of electromagnetic waves and gamma radiation was proposed. The radio frequency range makes it possible to study the structure of the landscape, and gamma radiation from backscattered ionizing radiation is a type of pollutant, as well as to ensure high accuracy in measuring the distance from the module to the upper layer of the underlying surface.

Keywords

gamma radiation, confidence interval, pollutant, environment, height determination, radio pulse, layer thickness, environmental situation, electromagnetic waves

For citation: Svitnev I.V., Naydanov A.F., Vilkov A.V., Sokolov D.A., Lebedev M.Yu., Kharitonova E.A., Lukyanova L.A. Collection and processing of environmental information in oil and gas production areas and solving other applied problems using active search methods (Review article). *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 144–155 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-144-155

Введение

В настоящее время основными задачами государственной политики в сфере обеспечения экологической безопасности являются: совершенствование системы государственного экологического мониторинга; научное и информационно-аналитическое обеспечение охраны окружающей среды, в том числе в отношении земельных ресурсов и территорий районов нефтегазодобычи. В последние годы проекты по добыче нефти и газа становятся более требовательными с точки зрения технологий и рисков, и нефтяники все большее внима-

ние уделяют трудноизвлекаемым запасам углеводородов. В результате появляется необходимость разработки новых месторождений и строительства транспортной инфраструктуры в труднодоступных районах. Развитие сектора нефтегазодобычи приводит к многократному увеличению площадей территорий, подлежащих экологическому мониторингу. Приоритетными направлениями при этом являются повышение технического потенциала и оснащенности сил, участвующих в мероприятиях по предотвращению и ликвидации негативных экологических последствий, и обеспечение развития программ обработки данных, позволяющих

своевременно получать достоверную информацию о состоянии окружающей среды¹.

Одной из основных форм контроля выполнения природоохранных мероприятий являются плановые и внеплановые инспекционные проверки, в рамках которых экологическое состояние территорий в нефтепромышленных районах оценивают преимущественно путем визуального осмотра с использованием, при необходимости, средств инструментального контроля.

Данный подход обуславливает наличие ряда объективных обстоятельств, которые ограничивают возможности органов управления, отвечающих за контрольно-надзорную деятельность. С одной стороны — наличие большого количества объектов и территорий, в том числе труднодоступных и значительных по площади, на фоне возрастания угроз экологической безопасности при наличии накопленного вреда окружающей среде. С другой стороны — необходимость контроля этих территорий при условии, что сбор данных, подлежащих анализу и учету, характеризующих их экологическое состояние, является достаточно трудоемким [1].

Нивелирование данного противоречия при решении задач экологического мониторинга территорий возможно путем привлечения средств аэрокосмической съемки, работа которых, как правило, основана на визуальных методах. Они позволяют охватить значительные и труднодоступные территории, но автоматизация обработки получаемых изображений относится к весьма сложной задаче. Дешифрирование полученной информации осуществляется вручную специалистом-дешифровщиком, либо экспертами. Кроме того, применение этих средств довольно ограничено условиями видимости, метеорологическими условиями и требованиями к безопасности полетов, что напрямую влияет на качество получаемых материалов. Также на результат мониторинга значительное влияние оказывает профессионализм дешифровщика и экспертов.

Вместе с тем указанные средства и реализуемые ими визуальные методы не предназначены для разведки структуры слоистой подстилающей поверхности, тем более в сложных метеорологических условиях. В настоящее время для решения подобных задач применяются контактные методы многократного бурения для определения толщин слоев подстилающей поверхности. Однако в эпоху развития робототехники такой метод не соответствует концепциям успешных добывающих компаний.

Одним из наиболее очевидных вариантов решения обозначенной проблемы является использование эффекта отражения и преломления электромагнитных волн при прохождении различных сред.

Техническая реализация данного принципа возможна, например, с беспилотного летательного аппарата. Однако метод по некоторым причинам не нашел применения. Основной из них является недостижение необходимой точности из-за ряда технических ограни-

чений, накладываемых на носитель аппаратуры, обусловленных условиями его применения, например учет нестабильности излучения при измерении яркости по спектральным каналам [2].

Таким образом, цель настоящей работы — повышение точности определения типов и толщин слоев подстилающей поверхности, обнаружение наличия на ней загрязнителей, и использование этих данных для оценивания экологического состояния земельных ресурсов в районах нефтегазодобычи. Также с применением такого подхода целесообразно рассматривать возможность решения смежных эколого-ресурсных задач, требующих получение информации о структуре и составе подстилающей поверхности.

Поставленная цель достигается решением задач по разработке методического аппарата, позволяющего определить содержание загрязнителя на подстилающей поверхности, оценить экологическую обстановку, а также обосновать технический облик комплекса распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности.

Научная новизна работы заключается в том, что предлагаемый способ принципиально отличается от известных активных способов зондирования использованием в дополнение к радиочастотному диапазону, позволяющему определять толщины и типы слоев подстилающей поверхности (снег-лед-вода-мерзлая почва), гамма-излучение, благодаря которому по обратно рассеянному фотонному излучению возможно определять состав загрязнителя на подстилающей поверхности [3], а также обеспечивать устойчивое поддержание высоты полета в условиях рыхлого (снежного) покрова.

Обзор существующих методов зондирования земной поверхности

В настоящее время уделяется особое внимание на проблемы экологии в нефтегазодобывающих районах, появляются новые технологические решения для эффективного сбора и анализа экологической информации. Рассмотрим подробнее несколько перспективных направлений таких исследований.

Дистанционное зондирование и дроны в экологическом мониторинге нефтегазовых регионов. Исследования, проведенные с помощью дистанционного зондирования и беспилотных летательных аппаратов (дронов), подчеркивают важность их применения [4]. Данные, собранные этими средствами, обеспечивают детальный мониторинг труднодоступных участков, а также позволяют в реальном времени отслеживать изменения в экосистемах².

Дистанционное зондирование основано на использовании спутников и аэросъемочных платформ для получения данных о поверхности Земли. Рабочий диапа-

¹Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».

² Киселевская К.Е. Применения метода дистанционного зондирования Земли для экологического мониторинга // ГИАБ. 2009. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniya-metoda-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-dlya-ekologicheskogo-monitoringa> (дата обращения: 13.11.2023).

зон длин волн, принимаемых съемочной аппаратурой, составляет от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны) [5].

Дроны предоставляют возможность собирать данные в реальном времени, обеспечивая более высокое пространственное и временное разрешения. Это позволяет эффективно обнаруживать и отслеживать утечки нефти, изменения в ландшафте и водных ресурсах [6, 7].

Сенсорные технологии в экологическом мониторинге нефтегазовых регионов. Сенсоры регулярно отслеживают выбросы и качество воды, предоставляя важные данные для контроля и предотвращения экологических аварий. Примером может служить использование сенсоров для измерения уровней метана, сероводорода и других газов вблизи нефтяных скважин, мониторинг качества воды в реках и озерах, а также реагирование на утечки нефти или химических веществ [8]. При этом выполняется автоматическая передача данных в центры управления, обеспечивая оперативный отклик на потенциальные экологические угрозы.

Использование сенсорных технологий в экологическом мониторинге нефтегазовых регионов предоставляет возможность оперативного реагирования на потенциальные угрозы и минимизацию вредного воздействия на природную среду¹.

Машинное обучение и анализ данных в экологическом мониторинге нефтегазового сектора. Нейронные сети применяют для выявления аномалий в данных и для автоматического реагирования на потенциальные угрозы. Главная причина внедрения нейронных сетей – возможность оперативного выявления аномалий в экологических данных. Методы глубокого обучения позволяют создавать модели, способные автоматически выявлять отклонения от нормы в параметрах окружающей среды, что создает условия для быстрого реагирования на потенциальные экологические угрозы².

Выводы по обзору методов зондирования земных поверхностей. В результате можно сделать следующие выводы. Современные технологии в экологическом мониторинге нефтегазовых регионов представляют собой мощный инструмент для контроля и реагирования на экологические угрозы. Дистанционное зондирование и дроны обеспечивают широкий охват и точный мониторинг. Сенсорные технологии создают условия непрерывного контроля параметров окружающей среды, а машинное обучение и анализ данных позволяют обрабатывать огромные объемы информации для выявления тенденций и предупреждений об угрозах.

¹ Казмина И.Г., Рязанцева Л.Т., Федянин В.И. Химические сенсоры в системе экологического мониторинга // Вестник ВГТУ. 2011. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/himicheskie-sensory-v-sisteme-ekologicheskogo-monitoringa> (дата обращения: 13.11.2023).

² Федутин К.А. Машинное обучение в задачах поддержки принятия решений при управлении охраной природы // ИВД. 2021. № 9 (81) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie-v-zadachah-podderzhki-prinyatiya-resheniy-pri-upravlenii-ohranoy-prirody> (дата обращения: 13.11.2023).

Решение задачи определения структуры подстилающей поверхности по отраженным электромагнитным сигналам

Известно, что различные среды, обладающие проводимостями, магнитными и диэлектрическими проницаемостями, являются для электромагнитных волн радиочастотного диапазона диэлектриками или проводниками, или полупроводниками. Отсюда следует разное соотношение между коэффициентами преломления, отражения и поглощения [9–11]. Производя измерение уровней отраженных сигналов E_1 – E_5 относительно исходного E_0 , можно судить о типах сред, находящихся на границе их раздела (рис. 1).

Пользуясь фундаментальными законами физики, установим необходимые соотношения для расчета толщины слоя [9].

Зависимость параметров (угол преломления и скорость) электромагнитной волны от среды, в которой она распространяется, получим в виде:

$$\sin \theta_i = \sqrt{\frac{\mu_r \varepsilon_r}{\mu_{r,i-1} \varepsilon_{r,i-1}}} \sin \theta_{i-1}, \quad (1)$$

$$v_i = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}, \quad (2)$$

где θ_i — угол преломления электромагнитной волны; μ_r и ε_r — магнитная и диэлектрическая проницаемости i -го слоя (после раздела сред); $\mu_{r,i-1}$ и $\varepsilon_{r,i-1}$ — магнитная и диэлектрическая проницаемости $i-1$ слоя (до раздела сред); θ_{i-1} и v_i — угол падения и скорость электромагнитной волны; c — скорость света в вакууме [12].

Формула (1) устанавливает зависимость угла преломления электромагнитной волны от среды, а (2) — скорость распространения электромагнитной волны в среде. Проецируя v_i на нормаль к границе раздела сред, получим:

$$v_{ni} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \sqrt{1 - \frac{\mu_r \varepsilon_r}{\mu_{r,i-1} \varepsilon_{r,i-1}}} \sin^2 \theta_{i-1}. \quad (3)$$

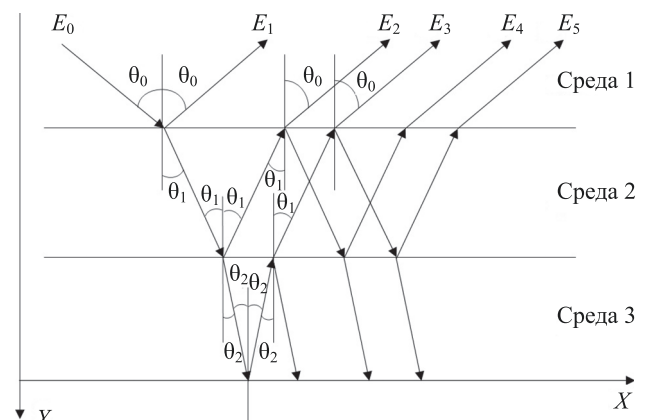


Рис. 1. Геометрическая модель распространения радиоволн в различных средах

Fig. 1. Geometric model of radio wave propagation in different environments

Определение толщин слоев выполним по временному интервалу между принимаемыми отраженными сигналами от границ раздела сред (рис. 1).

Определение глубины прохождения сигнала в средах H_n опишем системой уравнений:

$$\begin{cases} H_n = v_1 \frac{\tau_1}{2} + v_2 \frac{\tau_2}{2} + v_3 \frac{\tau_3}{2} + \dots + v_n \frac{\tau_n}{2} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\tau_i}{2}, \\ H_n = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n = \sum_{i=1}^n h_i, \end{cases} \quad (4)$$

где τ_i — время прохождения отраженных сигналов от i -го слоя; h_i — толщина i -го слоя; n — количество слоев (сред); i — номер слоя (среды).

С учетом системы уравнений (4) получим выражение для расчета слоя i -ой среды:

$$h_{in} = \frac{c(\tau_i - \tau_{i-1})}{\sqrt{\mu_{r_i} \epsilon_{r_i}}} \sqrt{1 - \frac{\mu_{r_i} \epsilon_{r_i}}{\mu_{r_{i-1}} \epsilon_{r_{i-1}}}} \sin^2 \theta_{i-1}, \quad (5)$$

где τ_{i-1} — время регистрации от $i-1$ -го слоя [12].

Из формулы (5) видно, что для расчета толщины слоя необходимо знать тип самого слоя. Для этого аналитически определим отношение принимаемого сигнала к излученному через коэффициенты отражения $P_{отр}$ и преломления $P_{пр}$:

$$P_{отр} = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i + Z_{i-1}}, \quad (6)$$

$$P_{пр} = \frac{2Z_i}{Z_i + Z_{i-1}}, \quad (7)$$

где $Z_i = \sqrt{\frac{\sigma_i}{\omega \epsilon_{r_i}}} \cos \theta_i$ — волновое сопротивление i -ой среды; σ_i — проводимость i -ой среды; ω — круговая частота падающей электромагнитной волны [12].

Для примера на рис. 2 показана диаграмма, иллюстрирующая потери энергии электромагнитной волны при отражении от различных типов сред. Данная диаграмма позволяет по отношению амплитуд принимаемого E и излученного E_0 сигналов определить тип среды, а затем, сравнив с параметрами среды, определить толщину слоя, используя математическую модель (1)–(7).

Как видно из рис. 2 [12], отражение электромагнитной волны от раздела воздух-снег, в отличие от других

границ, составляет менее 5 %, что оказывает влияние на определение высоты полета носителя аппаратуры относительно снежного покрова.

Использование гамма-излучения позволяет решить проблему определения высоты полета за счет высокой энергетики фотонного излучения и альбедо от различных поверхностей. Процессы рассеивания и поглощения гамма-излучения больше происходят в плотных слоях, поэтому на разделах воздуха и подстилающего основания, в том числе снежного покрова, будет фиксироваться значительное изменение альбедо.

Основной эффект взаимодействия гамма-квантов на границе раздела сред, позволяющий получить отраженное излучение — эффект Комптона [13]. При наличии данного эффекта энергия отраженных квантов зависит от угла падения.

Результаты расчетов показали, что оптимальным углом падения [14], при котором энергия принимаемых гамма-квантов наибольшая, является 30° – 45° относительно нормали к поверхности. В результате получим, что дальность действия такой системы очень зависит от физических размеров носителя аппаратуры и геометрического расположения ее компонентов — передатчика и приемника.

Точное определение высоты полета — важная техническая составляющая, так как определение загрязнителя на поверхности требует высокой чувствительности приемной аппаратуры.

Для минимизации мощности источника гамма-излучения предлагается высоту полета обеспечивать на достаточно минимальном уровне (от двух до нескольких десятков метров). Однако данная задача по определению оптимальной высоты полета требует проведения дополнительных исследований и в материал настоящей работы не входит. При определении высоты полета гамма-источник необходимо использовать в импульсном режиме.

Методика расчета содержания загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его достоверного обнаружения

Рассмотрим методику расчета концентрации и толщин слоев загрязнителя на подстилающей поверх-

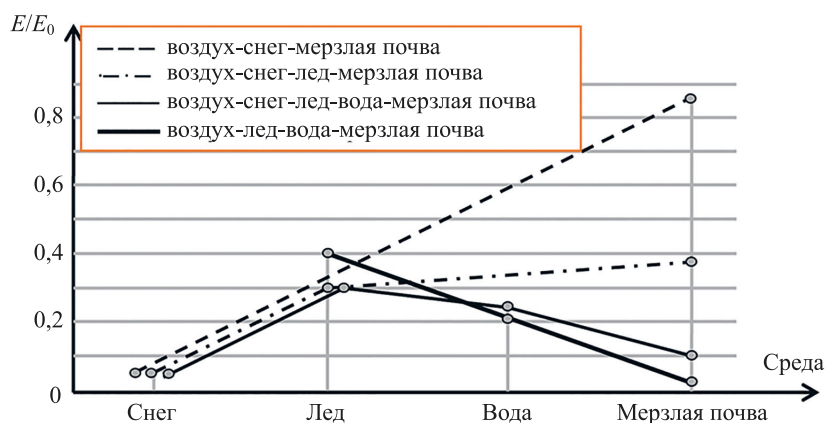


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая потери энергии электромагнитной волны при отражении от различных сред

Fig. 2. A diagram illustrating the electromagnetic wave energy losses during reflection from different environments

ности, в которой установление наличия (отсутствия) загрязнителя на подстилающей поверхности зависит от регистрации параметров обратно рассеянного ионизирующего излучения (ОРИИ) и погрешности средств измерения. Отметим, что на достоверность показаний измерительных средств значительное влияние оказывает геометрическое расположение их компонентов на носителе аппаратуры. Правильный расчет геометрического расположения компонентов аппаратуры позволяет далее говорить о подходах к точному нахождению загрязнителей. Так установлено, что исходя из высоты полета над подстилающей поверхностью не менее двух метров, база между передатчиком и приемником должна иметь размер от двух до четырех метров. Для современных беспилотных летательных аппаратов, выполненных на основе планера или квадрокоптера, такое условие трудновыполнимо. Однако это решение можно реализовать с использованием двух беспилотных летательных аппаратов или на малоразмерном беспилотном дирижабле [15].

Под термином «загрязнитель» понимается любой агент, имеющий природное или техногенное происхождение (физический агент или химическое вещество), попадающий в окружающую среду или возникающий в ней в количествах, которые выходят за рамки предельных естественных колебаний фона, и негативно влияющих на качество окружающей среды и здоровье человека. Исходя из определения, любое отклонение от нормированных показателей (границы которых известны) в окружающей среде на подстилающей поверхности быть не должно.

На рис. 3 представлена схема расчета содержания загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его достоверного обнаружения [16].

На этапе 1 вводятся исходные данные, которыми являются интенсивности ОРИИ от чистой подстилающей поверхности I^{cle} и загрязнителя I^{pol} , а также относительная погрешность средства измерения, обусловленная в первую очередь техническими характеристиками применяемого блока детектирования ионизирующего излучения.

На этапе 2, зная исходные данные, рассчитываются абсолютные погрешности, которые формируют доверительные интервалы значений ОРИИ от чистой поверхности и загрязнителя, т. е. интервалы значений, которые может принимать ОРИИ I_0^{sys} , по закону нормального распределения (рис. 4).

Так для чистой подстилающей поверхности абсолютная погрешность измерения ОРИИ будет составлять ΔI^{cle} , а для загрязнителя — ΔI^{pol} .

Таким образом, доверительные интервалы измерений ОРИИ для чистой подстилающей поверхности составят $[I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$, для загрязнителя $[I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{pol} + \Delta I^{pol}]$. При проведении измерений, с учетом погрешности измерения детектора, интенсивность ОРИИ может принять одно из значений в указанных интервалах.

Доверительные интервалы могут пересекаться (рис. 4, а). Возможен случай, когда $I^{cle} > I^{pol}$, тогда пересечение расчетных доверительных интервалов составит от $[I^{cle} - \Delta I^{cle}]$ до $[I^{pol} + \Delta I^{pol}]$. В случае, когда

$I^{cle} < I^{pol}$, пересечение доверительных интервалов — от $[I^{pol} - \Delta I^{pol}]$ до $[I^{cle} + \Delta I^{cle}]$.

Полученное детектором значение интенсивности в этих интервалах может говорить как о наличии загрязнителя на подстилающей поверхности, если $I_0^{sys} \in [I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{pol} + \Delta I^{pol}]$, так и о его отсутствии при соблюдении условия, что $I_0^{sys} \in [I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$.

Также возможен случай, когда расчетные значения доверительных интервалов ОРИИ от чистой подстилающей поверхности и загрязнителя не пересекаются (рис. 4, б). В этом случае значение интенсивности ОРИИ так же принимает одно из значений $I_0^{sys} \in [I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{pol} + \Delta I^{pol}]$ или $I_0^{sys} \in [I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$. Отсутствие пересечения доверительных интервалов говорит о том, что химические составы загрязнителя и чистой подстилающей поверхности отличаются настолько, что расчетные значения интенсивностей ОРИИ от них не пересекаются (с учетом погрешности средства измерения). Соответственно, при регистрации ОРИИ можно достаточно точно определить по полученному значению интенсивности, к чему она относится: к загрязнителю или чистой поверхности.

Таким образом, достоверность обнаружения наличия (отсутствия) загрязнения подстилающей поверхности (ЗПП) будет зависеть от того, с какой вероятностью значение интенсивности ОРИИ I_0^{sys} примет одно из следующих значений:

- $I_0^{sys} \in [I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{cle} - \Delta I^{cle}] \cup [I^{pol} + \Delta I^{pol}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$ при пересечении доверительных интервалов расчетных интенсивностей ОРИИ при $I^{cle} > I^{pol}$ (рис. 4, а);
- $I_0^{sys} \in [I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{pol} - \Delta I^{pol}] \cup [I^{cle} + \Delta I^{cle}; I^{pol} + \Delta I^{pol}]$ при пересечении доверительных интервалов расчетных интенсивностей ОРИИ при $I^{cle} < I^{pol}$ (рис. 4, а);
- $I_0^{sys} \in [I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{pol} + \Delta I^{pol}] \cup [I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$ при отсутствии пересечения доверительных интервалов расчетных интенсивностей ОРИИ при $I^{cle} < I^{pol}$ или $I^{cle} > I^{pol}$ (рис. 4, б).

Для расчета вероятности достоверного обнаружения наличия (отсутствия) загрязнителя принимаем, что I_0^{sys} по результатам проведенного измерения равновероятно примет одно из значений в диапазоне $[I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$, если $I^{cle} > I^{pol}$ или $[I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{pol} + \Delta I^{pol}]$, если $I^{cle} < I^{pol}$ (рис. 4, а). Либо для случая, когда доверительные интервалы не пересекаются, I_0^{sys} примет значение в интервале $[I^{pol} - \Delta I^{pol}; I^{pol} + \Delta I^{pol}] \cup [I^{cle} - \Delta I^{cle}; I^{cle} + \Delta I^{cle}]$ (рис. 4, б).

На этапе 3 рассчитаем области пересечения доверительных интервалов для всех случаев. В случае получения по результатам измерения значения интенсивности ОРИИ I_0^{sys} в области, которая относится к доверительным интервалам, как чистой подстилающей поверхности, так и загрязнителя, невозможно определить к какому именно интервалу это значение относится.

Для случая пересекающихся доверительных интервалов при $I^{cle} > I^{pol}$ (рис. 4, а) область пересечения рассчитаем следующим образом:

$$\Delta I^{err} = I^{pol} + \Delta I^{pol} - (I^{cle} - \Delta I^{cle}) = I^{pol} + \Delta I^{pol} - I^{cle} + \Delta I^{cle}, \quad (8)$$

где ΔI^{err} — область пересечения доверительных интервалов, при попадании значения интенсивности ОРИИ

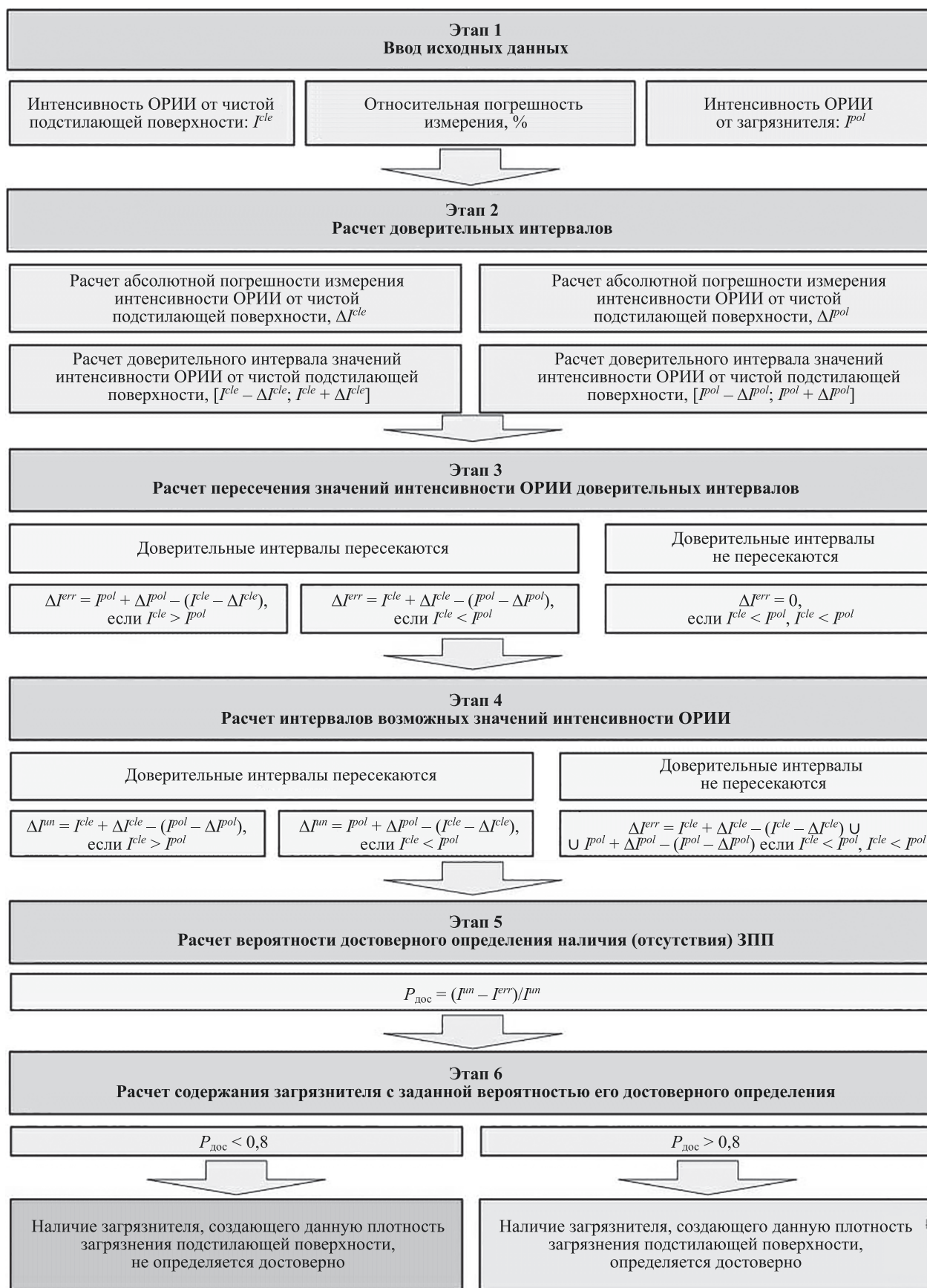


Рис. 3. Структурная схема расчета содержания загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его достоверного обнаружения

Fig. 3. Block diagram for calculation the content of a pollutant on the underlying surface with a given probability of its reliable detection

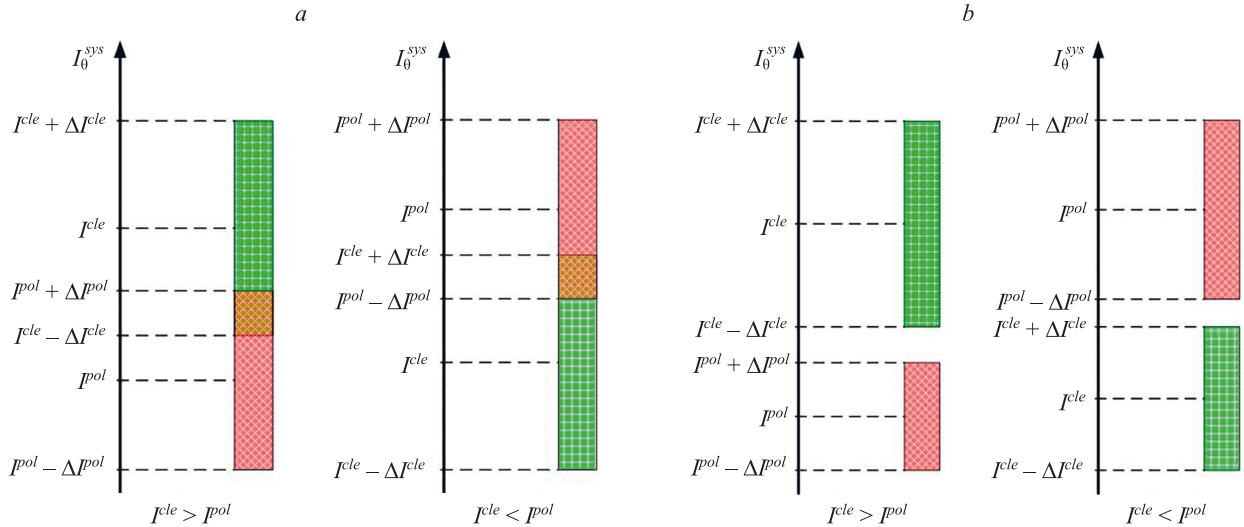


Рис. 4. Схемы доверительных интервалов интенсивностей обратно рассеянного ионизирующего излучения от чистой подстилающей поверхности (зеленый фон) и загрязнителя (красный фон), которые пересекаются (а) и не пересекаются (б)

Fig. 4. Schemes of confidence intervals for the intensities of backscattered ionizing radiation from a clean underlying surface and a pollutant that intersect (a) and do not intersect (b)

I_{θ}^{sys} в которую, наличие (отсутствие) ЗПП достоверно не определяется.

Для случая пересекающихся доверительных интервалов при $I_{cle} < I_{pol}$ (рис. 4, а) расчет области пересечения имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta I_{err} &= I_{cle} + \Delta I_{cle} - (I_{pol} - \Delta I_{pol}) = \\ &= I_{cle} + \Delta I_{cle} - I_{pol} + \Delta I_{pol}. \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что при отсутствии пересечения доверительных интервалов (рис. 4, б) интервал их пересечения $\Delta I_{err} = 0$.

На этапе 4, с учетом условия, что I_{θ}^{sys} принимает любое значение из области доверительных интервалов, получим области возможных значений интенсивности.

Для случая пересекающихся доверительных интервалов и при $I_{cle} > I_{pol}$ (рис. 4, а) область возможных значений рассчитаем по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta I_{un} &= I_{cle} + \Delta I_{cle} - (I_{pol} - \Delta I_{pol}) = \\ &= I_{cle} + \Delta I_{cle} - I_{pol} + \Delta I_{pol}, \end{aligned} \quad (10)$$

где ΔI_{un} — область возможных значений I_{θ}^{sys} .

Для случая пересекающихся доверительных интервалов и при $I_{cle} < I_{pol}$ (рис. 4, а) выражение (11) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta I_{un} &= I_{pol} + \Delta I_{pol} - (I_{cle} - \Delta I_{cle}) = \\ &= I_{pol} + \Delta I_{pol} - I_{cle} + \Delta I_{cle}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для случая непересекающихся доверительных интервалов (рис. 4, б) область возможных значений интенсивности I_{θ}^{sys} составит:

$$\begin{aligned} \Delta I_{un} &= [I_{cle} + \Delta I_{cle} - (I_{cle} - \Delta I_{cle}) + \\ &+ I_{pol} + \Delta I_{pol} - (I_{pol} - \Delta I_{pol})]. \end{aligned} \quad (12)$$

Исходя из условия, что I_{θ}^{sys} по результатам проведенного измерения равновероятно примет одно из зна-

чений в указанных интервалах, предположим, что вероятность того, что значение I_{θ}^{sys} попадет в тот или иной интервал пропорциональна размеру этих интервалов. Тогда вероятность достоверного обнаружения наличия (отсутствия) загрязнителя будет пропорциональна вероятности того, что значение I_{θ}^{sys} примет одно из значений в интервалах $[I_{pol} - \Delta I_{pol}; I_{cle} - \Delta I_{cle}] \cup [I_{pol} + \Delta I_{pol}; I_{cle} + \Delta I_{cle}]$ или $[I_{cle} - \Delta I_{cle}; I_{pol} - \Delta I_{pol}] \cup [I_{cle} + \Delta I_{cle}; I_{pol} + \Delta I_{pol}]$ при пересечении доверительных интервалов (рис. 4, а), или в интервалах $[I_{pol} - \Delta I_{pol}; I_{pol} + \Delta I_{pol}] \cup [I_{cle} - \Delta I_{cle}; I_{cle} + \Delta I_{cle}]$ при отсутствии их пересечения (рис. 4, б).

Зная области возможных значений ΔI_{un} , которые может принимать I_{θ}^{sys} области пересечения доверительных интервалов ΔI_{err} , при попадании I_{θ}^{sys} в которые наличие (отсутствие) загрязнения не определяется, а также исходя из пропорциональности вероятности попадания значения I_{θ}^{sys} в эти интервалы их размеру, на этапе 5 перейдем к вероятности достоверного определения наличия (отсутствия) ЗПП:

$$P_{дос} = \frac{\Delta I_{un} - \Delta I_{err}}{\Delta I_{un}}. \quad (13)$$

На заключительном этапе 6 рассчитаем содержание загрязнителя. При этом выполним оценку соответствия полученных значений вероятности обнаружения ЗПП критериальным методом [14].

Если $P_{дос} < 0,8$, то наличие загрязнителя, создающего данную плотность ЗПП, не определяется достоверно.

Если $P_{дос} \geq 0,8$, то наличие загрязнителя, создающего данную плотность ЗПП, определяется достоверно.

Значение 0,8, по достижении которого загрязнение определяется достоверно, выбрано как стандартное значение шкалы Харрингтона. Данное значение было применено в настоящей работе в связи с отсутствием требований по достоверности к предлагаемой авторами (8)–(13).

Представленный методический аппарат, позволяет рассчитывать содержание загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его достоверного обнаружения, которая задается исследователем.

Таким образом, разработанная методика позволяет определить значения интервалов плотности ЗПП, при которых, с использованием методики дистанционного обнаружения ЗПП, основанной на регистрации ОРИИ, с необходимой достоверностью определяется наличие (отсутствие) загрязнителя.

Устройство и принцип действия комплекса распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности

Принцип действия комплекса распознавания основан на регистрации обратно-отраженного радиочастот-

ного видеоимпульса и импульса гамма-излучения от границ разнородных сред, схема которого представлена на рис. 5 [17].

Основываясь на принципе действия рассматриваемого комплекса была предложена структурная схема, описывающая работу приемной части и порядок обработки информации (рис. 6).

В качестве генератора импульсов гамма-излучения предложено использовать «револьверный» способ преобразования непрерывного гамма-излучения от радиоизотопного источника в импульсное. Данный способ заключается в следующем. Путем вращения источника над коллиматором, выполненным в виде свинцового кольца с одним или несколькими отверстиями, обеспечивается попадание пучка гамма-излучения в эти отверстия и, тем самым, имитируются импульсы. Вращать можно и наоборот: коллиматор под неподвижным источником.

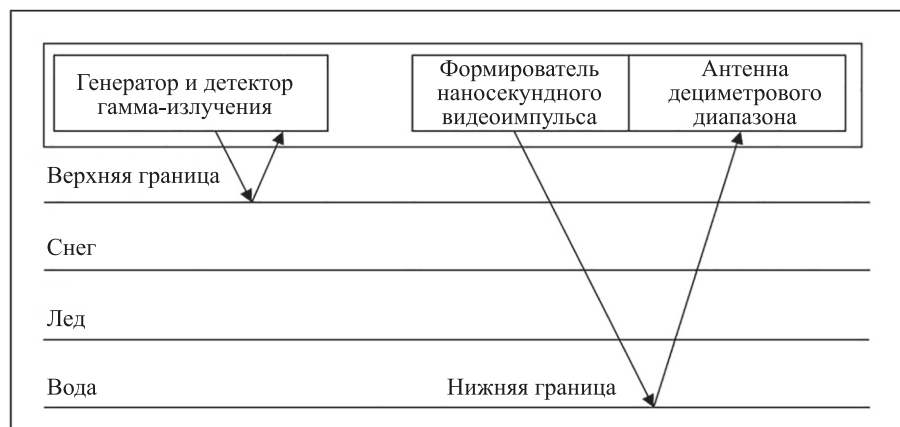


Рис. 5. Схема, поясняющая принцип действия комплекса распознавания сред

Fig. 5. The principle of operation of the environments recognition complex

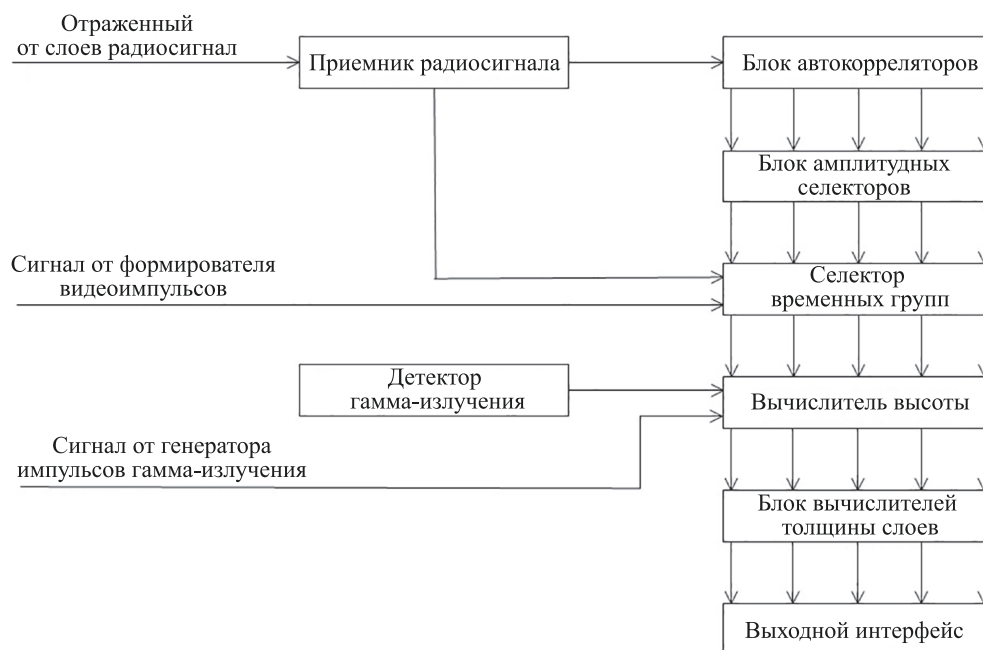


Рис. 6. Структурная схема приемной части комплекса распознавания сред

Fig. 6. Block diagram of the receiving part of environments recognition module

Рассмотрим алгоритм работы приемной части комплекса. Пусть передающая антенна испускает радиосигнал в дециметровом диапазоне длин волн по пяти различным частотам, под начальным углом падения $0,01^\circ$ к нормали границы раздела сред. Вместе с этим сигналом синхронно, за счет строгой привязки к стандарту частоты для данной системы (порядка 10^{-10} с⁻¹), испускается пучок фотонов с энергией, например 0,66 МэВ, под углом к нормали 45° . Тогда приемная антенна примет отраженную часть от испущенной волны. На приемную антенну поступает радиоимпульс с входными данными для радиоволны: время регистрации сигнала, частота, амплитуда огибающей, фаза в момент регистрации; для гамма-излучения: энергия пришедших фотонов, время их регистрации, при этом детектор гамма-излучения находится под углом в 45° к нормали, т. е. зеркально углу падения.

Принимаемый радиосигнал проходит оцифровку и поступает в компьютер модуля, где происходит его регистрация с привязкой ко времени поступления относительно излученного. Затем временной маркер разделяется на два канала: один проходит с сигналом в автокоррелятор, а другой попадает в селектор временных групп. Сигнал, проходя через автокорреляторы, после соответствующего отклика на одном из них, попадает в амплитудный селектор, где происходит сравнение сигнала с табличным значением его амплитуды. Тем самым происходит распознавание типа среды. После амплитудного селектора сигнал подается на селектор временных групп, где маркер времени, представляющий собой видеосигнал из передающей части, и маркер времени, отделенный в приемнике радиоволны, сравниваются между собой. Результатом сравнения является выстраивание сигналов в хронологическом порядке их приема.

Одновременно с приемом радиосигнала принимается импульс интенсивности ОРИИ I_{cle}^{cle} или I_{pol}^{pol} , который так же проходит привязку ко времени и оцифровку в приемнике гамма-излучения. Затем, после формирования временных групп, данные радиоимпульса и гамма-излучения используются для вычисления высоты полета воздушного средства. Далее рассчитываются толщины остальных слоев ландшафта. Рассчитанные и структурированные данные отправляются на выходной интерфейс и визуализируются.

Анализируя принцип действия приемной части данного комплекса, можно сказать, что гибкая система анализа слоистых сред позволит решать целый класс задач инженерной разведки, прикладной геодезии, эколого-ресурсных служб. Однако такие факторы, как большие размеры модуля и не стабильность измеряемых параметров, в частности амплитуды, не позволяют использовать его во время ведения боевых действий, когда необходимо в режиме реального времени проложить безопасный путь военной и специальной технике, а также личному составу. Решением этой проблемы может быть: использование нескольких диапазонов радиоволн; измерение более устойчивых параметров, несущих информацию о среде (например, набег фазы, поляризация).

Методика оценивания экологической обстановки

Предложенный способ активного поиска позволяет идентифицировать признаки вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды, который образовался в результате поступления в почву загрязняющих веществ, а также не ликвидирован вследствие низкого качества проведения мероприятий рекультивации загрязненной почвы. Учитывая действующие экологические стандарты, существует объективная необходимость при оценивании экологической обстановки использовать коэффициент оценки экологического состояния почвы, характеризующий несоблюдение нормативов качества окружающей среды для почв, включая нормативы предельно допустимых концентраций и ориентировочно допустимых концентраций химических веществ в почве. В результате:

— для оценивания степени загрязнения $C_{загр}$ и качества рекультивации загрязненных земель используем выражение:

$$C_{загр} = \frac{I_0^{sys} - I_{cle}^{cle}}{I_{cle}^{cle}};$$

— для оценивания ориентировочного экологического ущерба $У_{ор}$ (если $C_{загр} \in 0 \dots 1$) применим выражение:

$$У_{ор} = C_{загр} S_{загр} h_{in} K_{исп} T_{вр},$$

где $S_{загр}$ — площадь загрязнения (м²); h_{in} — глубина загрязнения, порчи почв; $K_{исп}$ — показатель, учитывающий категорию земель и вид разрешенного использования земельного участка; $T_{вр}$ — такса для исчисления размера вреда, причиненного почвам¹;

— для мониторинга экологического состояния почвы $M_{эсп}$ вблизи объектов промышленности и социальной инфраструктуры (рассчитывается, как частное в отношении средних характеристик распространения электромагнитной волны текущих и ранее проведенных исследований почвы):

$$M_{эсп} = I_{ср}^t / I_{ср}^{t-1},$$

где $I_{ср}^t$ и $I_{ср}^{t-1}$ — средние интенсивности ОРИИ на соответствующей территории для текущих и ранее проведенных исследований почвы.

В случае, если значения $C_{загр}$ или $M_{эсп}$ менее или равны 1, то экологическое состояние почвы оценивается как не испытывающее негативного воздействия.

Заключение

Предлагаемый комплекс сбора и обработки экологической информации может решать народно-хозяйственные задачи совместно с военно-прикладными.

¹ Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды. Утв. приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации 08.07.2010 № 238 (ред. от 18.11.2021): офиц. текст. М.: Маркетинг, 2021. 11 с.

К подобным типовым задачам в том числе относятся: инженерно-геодезические изыскания различных участков, площадок и трасс с целью составления планов и профилей; инженерно-геодезическое проектирование — преобразование рельефа местности для инженерных целей, подготовка геодезических данных для строительных работ; детальная разбивка осей сооружений; выверка конструкций и технологического оборудования в плане и по высоте; наблюдение за деформациями зданий и сооружений; установление характера и объема разрушений, завалов, пожаров, затоплений, естественных препятствий и отыскание пути их обхода; определение проходимости местности, состояния дорог и мостов.

Отметим, что для решения данной задачи впервые было предложено совместное использование ра-

диочастотного диапазона электромагнитных волн и гамма-излучения. При этом радиочастотный диапазон позволяет исследовать структуру ландшафта, а гамма-излучение по обратно-рассеянному ионизирующему излучению — тип загрязнителя, а также обеспечить высокую точность при измерении расстояния от модуля до верхнего слоя подстилающей поверхности. Кроме того, использование гамма-излучения обеспечит надежную работу данного комплекса при плохих погодных условиях.

Таким образом, решение военно-политических и эколого-ресурсных задач в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока может быть осуществлено при существенном прорыве в вопросах совершенствования технического облика средств мониторинга окружающей среды.

Литература

1. Притужалова О.А., Радченко К.С. Проблемы проведения производственного экологического контроля в строительных организациях // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 14(66). С. 145–154.
2. Куклина П.П., Качукова А.А., Кварачхелия Е.В., Песня Е.И., Бляхарский Д.П. Беспилотное воздушное лазерное сканирование // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. производство и образование: Сборник материалов IV всероссийской научно-практической конференции. 2021. С. 108–112.
3. Васильев В.Н. и др. Спектры излучения рентгеновских установок. М.: Энергоатомиздат, 1990. 143 с.
4. Храмов А.В., Ермолаев А.А., Шалашова А.И., Контрош Л.В. Возможности экологического мониторинга с применением БПЛА в России // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2017. № 7. С. 79–84.
5. Хабаров Д.А., Адиев Т.С., Попова О.О., Чугунов В.А., Кожевников В.А. Анализ современных технологий дистанционного зондирования Земли // Московский экономический журнал. 2019. № 1. С. 181–190. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-11068>
6. Абрамов Н.С., Макаров Д.А., Талалаев А.А., Фраленко В.П. Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ // Программные системы: теория и приложения. 2018. Т. 9. № 4(39). С. 417–442. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442>
7. Григорьев А.Н., Шабakov Е.И., Дементьев А.Н., Романов А.А. Метод сокращения избыточности данных дистанционного зондирования из космоса // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 1. С. 38–44. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-1-38-44>
8. Севрюкова Е.А., Волкова Е.А., Дорошенко В.А., Солодков А.В. Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 3. С. 98–108. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108>
9. Трофимова Т.И. Физика. 500 основных законов и формул. М.: Высшая школа, 2005. 64 с.
10. Лукьянов Л.А., Свитнев И.В., Харитонов Е.А., Гаврилов И.Е. Метод дистанционного контроля радиационных параметров космических аппаратов на основе рентгенофлуоресцентного анализа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 4. С. 650–658. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-4-650-658>
11. Чернецкая И.Е., Спесивова С.В. Мультиспектральное оптико-электронное устройство для автономной мобильной платформы экологического мониторинга // Труды МАИ. 2020. № 114. С. 13. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-14>
12. Дудкин Д.С., Найданов А.Ф., Свитнев И.В. Симулятор аппаратно-программного комплекса распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности методом зондирования электромагнитным излучением дециметрового, сантиметрового и

References

1. Prituzhalova O.A., Radchenko K.S. Problems of industrial environmental control in building companies. *Construction and Industrial Safety*, 2019, no. 14(66), pp. 145–154. (in Russian)
2. Kuklina P.P., Kachukova A.A., Kvarachelija E.V., Pesnja E.I., Bljaharskij D.P. Unmanned aerial laser scanning. *Geodesy, cartography, geoinformatics and cadastre. From idea to application. Collection of abstracts of the IV Russian Conference on Applied Science*, 2021, pp. 108–112. (in Russian)
3. Vasilev V.N. et al. *Emission Spectra of X-ray Installations*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990, 143 p. (in Russian)
4. Khramov A.V., Ermolaev A.A., Shalashova A.I., Kontrosh L.V. Possibilities of environmental monitoring with UAV use in Russia. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2017, no. 7, pp. 79–84. (in Russian)
5. Khabarov D.A., Adiev T.S., Popova O.O., Chugunov V.A., Kozhevnikov V.A. Analysis of modern technologies for remote sensing of the Earth. *Moscow Economic Journal*, 2019, no. 1, pp. 181–190. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-11068>
6. Abramov N.S., Makarov D.A., Talalaev A.A., Fralenko V.P. Modern methods for intelligent processing of earth remote sensing data. *Program Systems: Theory and Applications*, 2018, vol. 9, no. 4(39), pp. 417–442. (in Russian). <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442>
7. Grigoriev A.N., Shabakov E.I., Dementiev A.N., Romanov A.A. Method to reduce data redundancy in remote sensing from space. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 38–44. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-1-38-44>
8. Sevryukova E.A., Volkova E.A., Doroshenko V.A., Solodkov A.V. A prototype unit of a distributed sensor system for ecological monitoring. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 98–108. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108>
9. Trofimova T.I. *500 Basic Laws and Formulas*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2005, 64 p. (in Russian)
10. Lukyanova L.A., Svitnev I.V., Kharitonova E.A., Gavrilov I.E. Method for remote control of radiation parameters of spacecraft based on X-ray fluorescence analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 650–658. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-4-650-658>
11. Chernetskaya I., Spevakova S. Multispectral electronic device for autonomous mobile platform of ecological monitoring. *Trudy MAI*, 2020, no. 114, pp. 13. (in Russian). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-14>
12. Dudkin D.S., Naidanov A.F., Svitnev I.V. Simulator of a hardware-software complex for recognizing the types and layers thicknesses of the underlying surface by probing with electromagnetic radiation in the decimeter, centimeter and X-ray ranges. *Certificate of the state computer program registration RU2018614834*, 2018. (in Russian)

- рентгеновского диапазонов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2018614834. 2018.
13. Алексеев Н.В. Новый взгляд на эффект Комптона // Прорывные научные исследования как двигатель науки: сборник статей международной научно-практической конференции. М.: Аэтерна, 2019. С. 9–15.
 14. Кулганов В.А., Свитнев И.В., Соколов Д.А., Нигматуллин Р.А. Метод обнаружения загрязнений подстилающей поверхности по характеристикам обратно рассеянного ионизирующего излучения // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева / под общ. ред. Ю.В. Кулешова. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020. С. 206–212.
 15. Соколов Д.А., Косырев С.В., Кислицына И.А. Методика расчета содержания загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его определения // Экология и развитие общества. 2021. № 1(35). С. 31–38.
 16. Любушин Н.П., Бричка Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // Экономический анализ: теория и практика. 2014. № 18(369). С. 2–10.
 17. Дудкин Д.С., Найданов А.Ф., Свитнев И.В. Модуль распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности в условиях Крайнего Севера // Инновации. 2018. № 11(241). С. 116–121.
 13. Alekseev N.V. New look at the Compton effect. *Breakthrough scientific research as the engine of science: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. Moscow, Ajeterna Publ., 2019, pp. 9–15. (in Russian)
 14. Kulganov V.A., Svitnev I.V., Sokolov D.A., Nigmatullin R.A. Method for detecting the contamination of the underlying surface based on the characteristics of backscattered ionizing radiation. *Proc. of the All-Russian Scientific Conference "Ecology and Space" named after Academician K.Ya. Kondratiev*, 2020, pp. 206–212. (in Russian)
 15. Sokolov D.A., Kosyrev S.V., Kislytsyna I.A. Rodeure for calculating the contaminant content on the substrate surface with a given probability of its reliable determination. *Ecology and Society Development*, 2021, no. 1(35), pp. 31–38. (in Russian)
 16. Liubushin N.P., Brikach G.E. Harrington's desirability generalized function in multiple parameter economic tasks. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2014, no. 18(369), pp. 2–10. (in Russian)
 17. Dudkin D.S., Naydanov A.F., Svitnev I.V. Module of recognition of types and thicknesses of the underlying surface under the conditions of the far north. *Innovations*, 2018, no. 11(241), pp. 116–121. (in Russian)

Авторы

Свитнев Игорь Владимирович — кандидат военных наук, доцент, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 10040324500](https://orcid.org/0000-0002-8862-1797), <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>, isvitnev@mail.ru

Найданов Александр Фотеевич — кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-4242-1700>, naydanov@bk.ru

Вилков Алексей Владимирович — кандидат технических наук, преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9300-3547>, Leha_kostroma@mail.ru

Соколов Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-0111-403X>, falcon.85@bk.ru

Лебедев Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-8876-7846>, Lebedev.m1hall@yandex.ru

Харитонов Елена Александровна — кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, [sc 57885000100](https://orcid.org/0000-0002-4851-2756), <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>, Xaritonova_ea@mail.ru

Лукьянова Людмила Анатольевна — старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>, lalukianova@mail.ru

Authors

Igor V. Svitnev — PhD (Military Sciences), Associate Professor, Associate Professor, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 10040324500](https://orcid.org/0000-0002-8862-1797), <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>, isvitnev@mail.ru

Alexander F. Naydanov — PhD, Associate Professor, Senior Lecturer, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-4242-1700>, naydanov@bk.ru

Alexey V. Vilkov — PhD, Lecturer, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9300-3547>, Leha_kostroma@mail.ru

Dmitry A. Sokolov — PhD, Lecturer, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-0111-403X>, falcon.85@bk.ru

Mikhail Yu. Lebedev — PhD, Lecturer, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-8876-7846>, Lebedev.m1hall@yandex.ru

Elena A. Kharitonova — PhD (Medicine), Associate Professor, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, [sc 57885000100](https://orcid.org/0000-0002-4851-2756), <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>, Xaritonova_ea@mail.ru

Lyudmila A. Lukyanova — Senior Lecturer, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>, lalukianova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2023
Одобрена после рецензирования 15.12.2023
Принята к печати 26.01.2024

Received 27.06.2023
Approved after reviewing 15.12.2023
Accepted 26.01.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»