

# Модуль распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности в условиях Крайнего Севера



**Д. С. Дудкин,**  
курсант-слушатель,  
кафедра телеметрических систем,  
комплексной обработки  
и защиты информации  
danildudkin@inbox.ru



**А. Ф. Найданов,**  
к. т. н., доцент,  
кафедра радиационной,  
химической  
и биологической защиты  
naydanov@bk.ru



**И. В. Свитнев,**  
к. воен. н., доцент,  
кафедра радиационной,  
химической  
и биологической защиты

**Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского**

*Рассматривается вопрос создания модуля распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности в условиях Крайнего Севера и Дальнего Востока методом зондирования электромагнитным излучением с беспилотного летательного аппарата. Приведен минимальный методический материал, на котором базируется создание данного модуля. Принципиальной особенностью предлагаемого способа выявления структуры подстилающего основания является в дополнение к радиочастотному диапазону использование рентгеновского излучения. Приведена схема приемной части модуля, и рассмотрена его работа. Отмечено, что подобную задачу удобно решать на малоразмерном беспилотном дирижабле.*

**Ключевые слова:** зондирование подстилающей поверхности, Крайний Север, Дальний Восток, беспилотный летательный аппарат, дирижабль, рентгеновское излучение.

## Введение

Складывающаяся геополитическая картина мира и определяемые ею вызовы обуславливают направления развития современных видов вооружения, военной и специальной техники и, в том числе, средств робототехники.

В настоящее время военные ведомства ведущих государств рассматривают роботизацию военной техники как одно из перспективных направлений развития средств вооруженной борьбы, максимально исключая пребывание личного состава в зоне досягаемости огневых средств противника и действия поражающих факторов различной природы и позволяющих использовать новые возможности для решения специальных задач.

Решение военно-политических и экологических задач в районах Крайнего Севера, Дальнего Востока может потребовать оперативно владеть информацией о состоянии ландшафта в районах, прилегающих к устьям рек, на побережьях материковой части и на островах [1, 2].

Арктика и приарктические районы являются зоной интересов многих стран, и Россия, имея территориаль-

ный приоритет, так же заинтересована в удержании позиций в данном регионе, что приводит к необходимости установления мест высадки десанта, возможности переброса ВВТ, развертывания войск и баз, выявления маскирующих свойств местности.

Помимо задач инженерной разведки необходимо обеспечивать решение задач прикладной геодезии в мирных целях: прокладка пути следования кораблей, судов и трассировка трубопроводов, выявления мест пригодных для строительства и обживания.

Структура ландшафта в северных широтах представляет собой «слоеный пирог»: снег, лед, вода, мерзлый грунт. Поэтому, возникает необходимость в проведении разведки глубины снежного покрова, толщины льда и уровня воды, для того чтобы решить перечисленные задачи.

Ледовую разведку в основном организуют и выполняют органы Росгидромета Министерства природных ресурсов и экологии РФ. Участие в этом принимают Минобороны России в интересах Военно-морского флота и инженерных войск, а также МЧС России в период быстро развивающихся чрезвычайных ситуаций с ледовыми заторами на реках РФ и при спасении людей на льду рек и водоемов [3].

Основными методами (способами) ледовой разведки являются наземные (водные), воздушные (авиационные) и космические наблюдения. Воздушная ледовая разведка ведется с помощью самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов. Для определения динамики границ ледового покрова, его толщины и сплоченности используются данные метеорологических и других искусственных спутников Земли. Технические средства ледовой разведки могут быть визуальными или инструментальными, включая радиолокационные станции бокового обзора типа «Горос», измерители толщины льда типа «Аквармарин», эхоледомеры, обнаружители разводий, аэрофото-съемочная аппаратура, радиационные термометры, актинометрические датчики и т. д. [3].

Однако, указанные средства и реализуемые ими методы не предназначены для разведки структуры слоистой подстилающей поверхности, тем более в сложных метеорологических условиях.

В настоящее время при решении подобных задач применяется контактный метод бурения для определения глубины снежного покрова и толщины льда, что повышает вероятность потерь среди личного состава и невыполнения поставленной задачи в короткие сроки. И, наконец, в эпоху развития робототехники данный метод явно не укладывается в концепцию современных армий.

Одним из наиболее очевидных вариантов решения данной проблемы является использование эффекта отражения и преломления электромагнитных волн при прохождении различных сред. Техническая реализация данного принципа возможна с воздушного средства, в том числе, с беспилотного летательного аппарата. Однако метод не нашел применения из-за ряда недостатков. Основным из них является не достижение необходимой точности из-за ряда технических ограничений, заложенных в носитель аппаратуры. Это, в первую очередь, обусловлено погодными условиями Крайнего Севера (частые осадки), что вносит существенный вклад в ослабление и рассеивание зондирующего сигнала. Для уменьшения отрицательного эффекта воздушное средство требуется вести близко

к поверхности, что может привести к аварийной ситуации. Указанные недостатки не позволили в полной мере развить и программное обеспечение.

Таким образом, появляется новая задача по достаточно точному определению высоты полета относительно подстилающей поверхности с учетом высотного и энергетического альбедо.

Такую задачу возможно решить путем использования электромагнитных волн рентгеновского диапазона. А с учетом развития вычислительной техники и возможности появления, в связи с этим, эффективного программного обеспечения решение задачи определения структуры и толщин слоев подстилающей поверхности можно рассматривать с позиции применения новых средств и методов.

## Методический аппарат по решению задачи определения структуры подстилающей поверхности по отраженным электромагнитным сигналам

Известно, что различные среды, обладающие соответствующими проводимостями, магнитными и диэлектрическими проницаемостями, являются для электромагнитных волн радиочастотного диапазона либо диэлектриками, либо проводниками, либо полупроводниками. Отсюда вытекает различное распределение между коэффициентами преломления, отражения и поглощения (рис. 1). Производя измерение уровня отраженного сигнала относительно исходного можно судить о типах сред, представляющих границу раздела.

Пользуясь фундаментальными законами физики, установим необходимые соотношения для расчета толщины слоя [4, 5].

Зависимость скорости ЭМВ от среды, в которой она распространяется, описывается следующими выражениями:

$$\sin \theta_n = \left( \frac{\mu_{r_i} \varepsilon_{r_i}}{\mu_{r_{i-1}} \varepsilon_{r_{i-1}}} \right)^{1/2} \sin \theta_{n-1}, \quad (1)$$

$$v_i = \frac{c}{(\mu_{r_i} \varepsilon_{r_i})^{1/2}}, \quad (2)$$

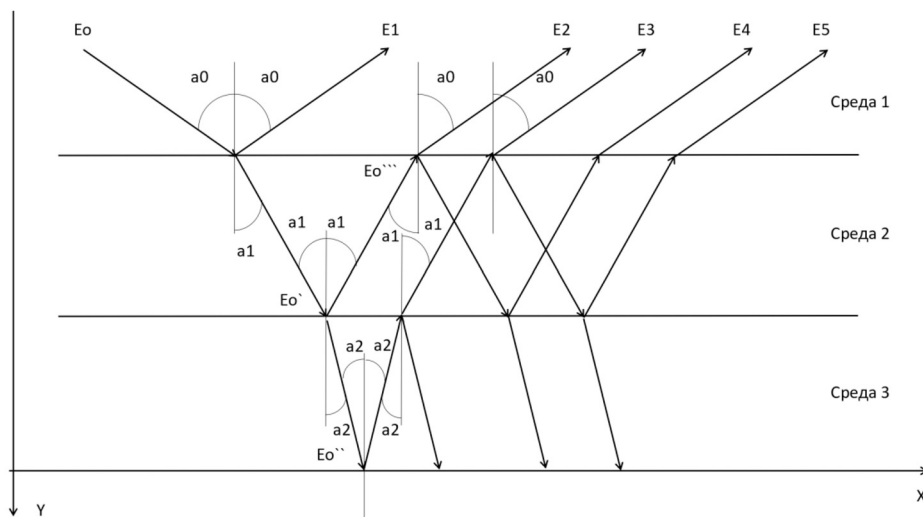


Рис. 1. Модель поведения ЭМВ в радиочастотном и инфракрасном диапазонах в средах

где  $\mu_{r_{i-1}}$  и  $\varepsilon_{r_{i-1}}$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость  $i-1$  слоя (до раздела сред);  $\mu_{r_i}$  и  $\varepsilon_{r_i}$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя (после раздела сред);  $c$  — скорость света в вакууме;  $\theta_{n-1}$  — угол падения;  $\theta_n$  — угол преломления.

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

$$v_{ni} = \frac{c}{2(\mu_{r_i}\varepsilon_{r_i})^{1/2}} \left( 1 - \frac{\mu_{r_i}\varepsilon_{r_i}}{\mu_{r_{i-1}}\varepsilon_{r_{i-1}}} \sin^2 \theta_{n-1} \right)^{1/2},$$

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

Определение глубины прохождения сигнала в средах  $H_n$  можно описать следующей системой:

$$\begin{cases} H_n = v_1 \frac{\tau_1}{2} + v_2 \frac{\tau_2}{2} + v_3 \frac{\tau_3}{2} + \dots + v_n \frac{\tau_n}{2} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\tau_i}{2} \\ H_n = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n = \sum_{i=1}^n h_i, \end{cases} \quad (3)$$

С учетом системы (3) получим выражение для расчета слоя одной среды:

$$h_{in} = \frac{c}{2(\mu_{r_i}\varepsilon_{r_i})^{1/2}} \left( 1 - \frac{\mu_{r_i}\varepsilon_{r_i}}{\mu_{r_{i-1}}\varepsilon_{r_{i-1}}} \sin^2 \theta_{n-1} \right)^{1/2} (\tau_n - \tau_{n-1}), \quad (4)$$

где  $\tau_n$  — время регистрации сигнала от  $n$ -го слоя;  $\tau_{n-1}$  — время регистрации сигнала от  $n-1$ -го слоя;  $c$  — скорость света в вакууме;  $\mu_{r_{i-1}}$  и  $\varepsilon_{r_{i-1}}$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость  $i-1$  слоя (до раздела сред);  $\mu_{r_i}$  и  $\varepsilon_{r_i}$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя (после раздела сред);  $N$  — количество слоев;  $i$  — номер среды;  $n$  — номер слоя.

Из формулы (4) видно, что для расчета толщины слоя необходимо знать тип самого слоя. Для этого

аналитически определим отношение принимаемого сигнала к излученному через коэффициенты отражения и преломления:

$$P_{отр} = \frac{Z_{n2} - Z_{n1}}{Z_{n2} + Z_{n1}},$$

$$P_{пр} = \frac{2Z_{n2}}{Z_{n2} + Z_{n1}},$$

где

$$Z_i = ((\sigma_i / (\omega \varepsilon_i)) \cos \theta_i)^{1/2},$$

$\sigma_i$  — проводимость  $i$ -й среды;  $\omega$  — частота падающей ЭМВ;  $\varepsilon_i$  — диэлектрическая проницаемость  $i$ -й среды;  $\theta$  — угол преломления (отражения) в  $i$ -й среде.

Как видно из рис. 2 (отметка «1» для границы раздела «воздух–снег»), отражение электромагнитной волны от раздела воздух–снег в отличие от других границ составляет менее 5%, что также определяет трудность определения высоты полета относительно снежного покрова.

Использование электромагнитных волн рентгеновского диапазона позволяет решить проблему определения высоты за счет высокой энергетики частиц и альбедо от различных поверхностей. Процессы рассеивания и поглощения рентгеновского излучения больше происходят в плотных слоях, поэтому на разделах воздуха и подстилающего основания, в том числе снежного покрова, будет фиксироваться значительное изменение альбедо (рис. 3).

Основным эффектом взаимодействия рентгеновских квантов на границе раздела сред является эффект Комптона. Согласно данному закону энергия отраженных квантов зависит от угла падения. В свою очередь, энергия фотона имеет прямо пропорциональную зависимость от частоты, которую можно вычислить, используя формулу указанного эффекта:

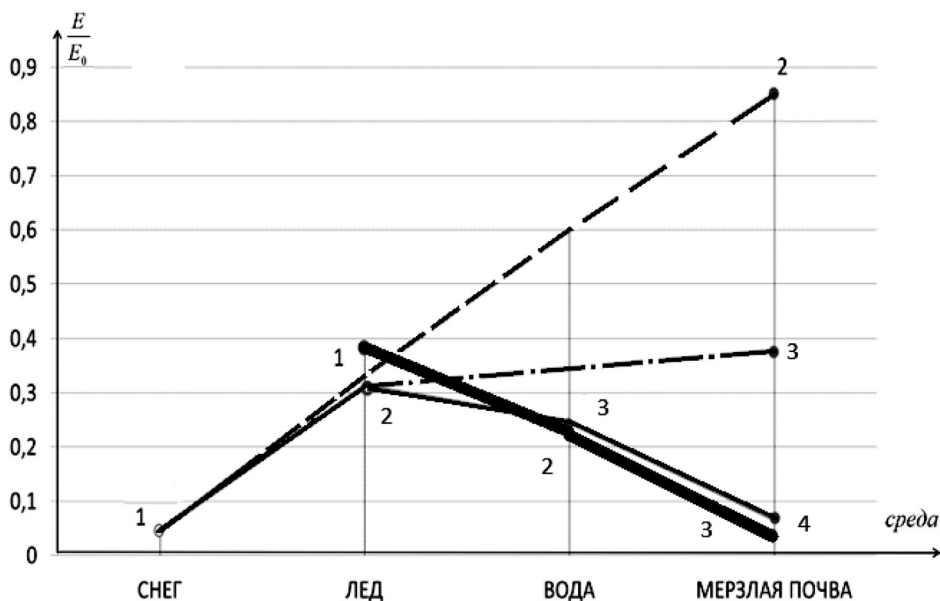


Рис. 2. Диаграмма, отражающая прохождение электромагнитных волн дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн через различные структуры ландшафта:

- воздух – снег – мерзлая почва;
- · - · - воздух – снег – лед – мерзлая почва;
- воздух – снег – лед – вода – мерзлая почва;
- воздух – лед – вода – почва

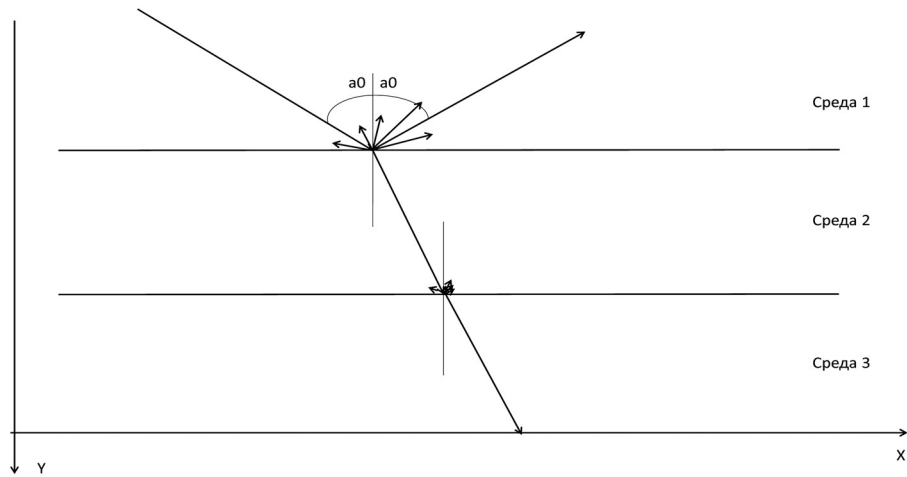


Рис. 3. Модель поведения ЭМВ в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах в средах

$$\nu' = \nu \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \gamma)}$$

где  $\nu'$  — частота фотона после взаимодействия;  $\nu$  — частота фотона до взаимодействия;  $m_e$  — масса электрона.

Расчеты показали, что оптимальным углом падения, при котором энергия принимаемых рентгеновских квантов наибольшая, является  $30-45^\circ$  относительно нормали к поверхности. Отсюда видно, что дальность действия такой системы сильно зависит от геометрических характеристик базы, на которой расположены передатчик и приемник. Так, 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 трудно выполнимо. Однако это решение можно реализовать на малоразмерном беспилотном дирижабле.

Достоинства его очевидны: относительно малый расход топлива, дальность и продолжительность полета, возможность размещения крупногабаритной полезной нагрузки, вертикальный взлет и посадка, работа в режиме длительного зависания, безопасность

эксплуатации. Дирижабль, как носитель, позволяет не учитывать геометрические ограничения, что положительно скажется на дальности действия системы, решающей мониторингово-прикладные задачи.

### Устройство и принцип действия модуля модуль распознавания типов и толщин слоев подстилающей поверхности

Принцип действия и состав технических средств комплекса распознавания сред показан на рис. 4. В него входят кроме импульсного радиолокатора и приемной антенны генератор и детектор рентгеновского излучения.

Рассмотрев базовые положения идеи работы комплекса и возможные варианты его реализации была предложена структурная схема, описывающая работу приемной части и порядок обработки информации (рис. 5).

Рассмотрим алгоритм работы модуля. Пусть передающая антенна испускает радиоимпульс в ДМ-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 привязке к стандарту частоты для данной системы (порядка  $10^{-10}$  с), испускается рентгенов-

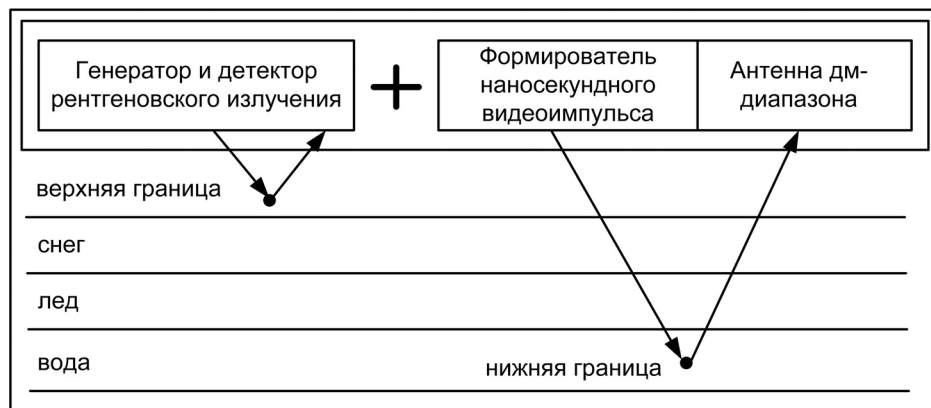


Рис. 4. Принцип действия комплекса распознавания сред

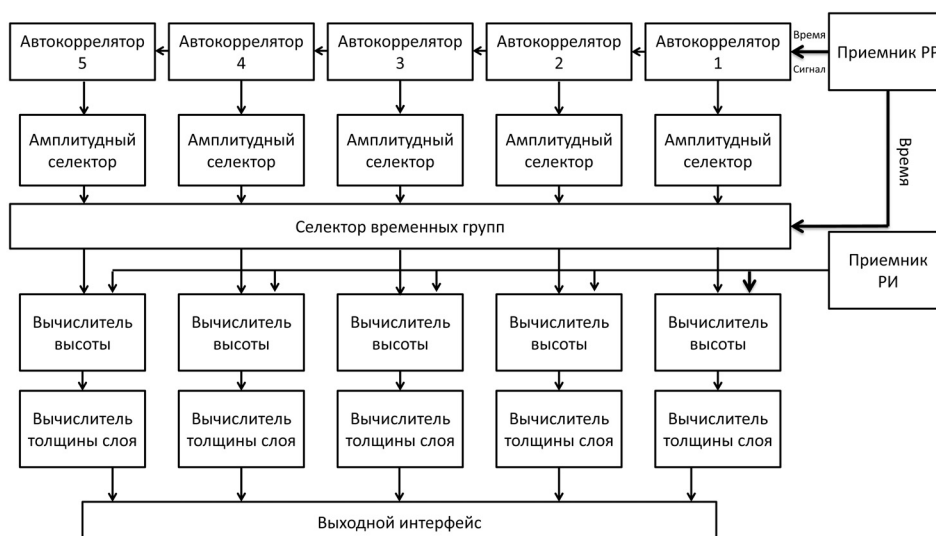


Рис. 5. Структурная схема приемной части модуля распознавания сред

ский импульс (пучок фотонов) со средней энергией 40-50 кэВ под углом к нормали в  $-45^\circ$ . 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 рентгеновского излучения: энергия пришедших фотонов, время их регистрации, при этом приемная антенна для рентгеновского излучения находится под углом в  $45^\circ$  к нормали, т. е. зеркально углу падения.

Принимаемый радиоимпульс 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 сигнала 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 рентгеновское излучение, который так же проходит привязку ко времени и оцифровку в приемнике рентгеновского излучения. Затем, после формирования временных групп данные радиоимпульса и рентгеновского излучения используются для вычисления высоты полета модуля, после чего рассчитываются толщины остальных слоев ландшафта. Рассчитанные и структурированные данные отправляются на выходной интерфейс и визуализируются.

Анализируя принцип действия данного модуля 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).

## Заключение

Предлагаемый комплекс может решать народно-хозяйственные задачи совместно с военноприкладными. 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.

В заключение отметим, что для решения данной задачи впервые было предложено совместное использование радиочастотного и рентгеновского диапазона электромагнитных волн. При этом радиочастотный диапазон позволяет исследовать структуру ландшафта, а рентгеновский диапазон обеспечивает высокую точность при измерении расстояния от модуля до верхнего слоя подстилающей поверхности. Кроме того, использование рентгеновского излучения обеспечит надежную работу модуля 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.

#### *Список использованных источников*

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г. (утв. Президентом РФ 08.02.2013 г. № Пр-232). Законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации. <http://legalacts.ru/doc/strategija-razvitija-arkticheskoi-zony-rossiiskoi-federatsii.html>.
2. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 г.» (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366). Министерство экономического развития Российской Федерации. Департамент регионального развития. <http://economy.gov.ru/minrec/about/structure/depOsobEcZone/201412263.html>.
3. Ледовая разведка. Центральный региональный центр МЧС России. <http://central.mchs.ru/document/217187.html>.
4. Г. П. Грудинская. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1975. С. 280.
5. В. Н. Васильев и др. Спектры излучения рентгеновских установок: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990.

#### **Module of recognition of types and thicknesses of the underlying surface under the conditions of the Far North**

**D. S. Dudkin**, cadet-listener, department of telemetry systems, complex processing and protection of information, faculty of radio-electronic systems of space complexes.

**A. F. Naydanov**, candidate of technical sciences, associate professor, department radiation, chemical and biological protection.

**I. V. Svitnev**, candidate of military sciences, associate professor, department radiation, chemical and biological protection.

(Military space academy n. a. A. F. Mozhaisky)

The issue of creating a module for recognizing the types and thicknesses of layers of the underlying surface in the conditions of the Far North and Far East by the method of probing electromagnetic radiation from unmanned aircraft. In this text given minimal methodical material on which the creation of this module is based. The principal feature of the proposed method for revealing the structure of the underlying base in addition to the radio frequency range is the use of X-rays. Also given the scheme of the receiving part of the module and its operation is considered. It was noted that convenient to solve similar problem on a small-size unmanned dirigible.

**Keywords:** probing of the underlying surface, Far North, Far East, unmanned aircraft, dirigible, X-ray.

#### *С 12 по 14 марта 2019 в Санкт-Петербурге пройдут международная выставка инноваций HI-TECH и ежегодный конкурс «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года».*

Выставка HI-TECH проводится выставочным объединением «РЕСТЭК» с 1996 г. и является первым в России мероприятием в области продвижения высоких технологий, инноваций и инвестиционных проектов в научно-технической сфере. Мероприятие проходит на одной площадке с крупнейшей на Северо-Западе промышленной выставкой Петербургской технической ярмаркой при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ и Правительства Санкт-Петербурга.

Следуя своему девизу – «От инновации – к реализации», выставка является связующим звеном между наукой и производством, разработчиками и инвесторами.

Основными экспонентами выступают государственные научные центры, научно-исследовательские институты, вузы, промышленные предприятия, технопарки. Также, со своими инновационными разработками, на выставке представлены региональные экспозиции.

Тематика выставки – это инновации для различных отраслей промышленности, в том числе робототехника, нанотехнологии, аддитивные технологии, технологии машинного зрения, биотехнологии, системы безопасности и др. Новым разделом выставки является специальная зона, посвященная проектам технопарков и бизнес-инкубаторов – StartUp Village.

Выставку сопровождает насыщенная деловая программа: конференции, круглые столы, презентации и семинары, биржа деловых контактов. Одна из ключевых возможностей для участников выставки HI-TECH – участие в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года».

Конкурс, учрежденный Министерством науки и технологий России, уже более 20 лет стимулирует деятельность предприятий в области инновационных технологий. За годы его проведения было награждено более 3500 разработок в различных областях промышленности. С 2016 года в рамках конкурса работает инвестиционная сессия ИНВЕСТОДРОМ – новое пространство для развития «зрелых» инвестиционных проектов и формирования интерактивной инвестиционно-инновационной среды.

Участие в конкурсе дает возможность заявить о себе как о передовой компании, найти инвесторов для реализации своих идей, получить профессиональную экспертную оценку специалистов отрасли – конкурсную экспертизу проектов проводит ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ и МСВЭИ (Межотраслевой союз развития высокотехнологичного экспорта и импортозамещения).

Номинации конкурса:

- Лучший бизнес-инкубатор, лучший инновационно-технологический центр, лучшая венчурная компания.
- Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года цифровой российской экономики.
- Лучший молодежный инновационный проект.
- Лучшая инновация в импортозамещении, локализации, импортопережени: успешное продвижение на рынок, конкурентоспособное производство, склад, логистика.
- Лучший инновационный проект (разработка) в различных областях промышленности.

Выставка и конкурс HI-TECH ежегодно подтверждают статус эффективной площадки для развития инновационного бизнеса и продуктивного взаимодействия научных организаций и потенциальных инвесторов. В 2018 году комплекс мероприятий собрал более 200 компаний – участников из 11 стран, более 6000 специалистов из 32 стран посетили выставки, более 1000 делегатов приняли участие в деловой программе.

Подробная информация на странице выставки [www.hitech-expo.ru](http://www.hitech-expo.ru).