

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>

УДК 621.396.96

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОРАДАРА НА БЕСПИЛОТНОМ НОСИТЕЛЕ ДЛЯ ПОИСКА ВОДОНОСНОГО СЛОЯ В ЗАСУШЛИВЫХ РАЙОНАХ

А. И. Баскаков¹, Б. Одсурэн², А. А. Комаров¹, Г. Тувдендоорж²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

² Институт физики и технологий Монгольской Академии Наук, Монголия,
13330, г. Улан-Батор, проспект Мира, 546

Статья поступила в редакцию 12 июля 2021 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается расчет потенциала георадара, находящегося на борту беспилотного летательного аппарата, предназначенного для поиска подземных вод в засушливых и пустынных районах Монголии. В качестве грунтов как среды распространения радиоволн взяты типы почв, главенствующих в исследуемых районах. Особенностью почв засушливых и пустынных районов является то, что они имеют почти одинаковую диэлектрическую проницаемость лишь с небольшим отличием удельного затухания из-за малого содержания воды. Рассмотрены грунты с возможными типичными моделями изменения диэлектрической проницаемости грунта по глубине.

Ключевые слова: георадар, беспилотный летательный аппарат, грунт засушливых районов, поиск подземных вод, электрофизические характеристики грунта, требуемый потенциал георадара.

Abstract. In this paper we consider the calculation of the potential of a georadar on board an unmanned aerial vehicle designed to search for groundwater in arid and desert regions of Mongolia. The soil types prevailing in the regions under study were taken as soils as a medium for the propagation of radio waves. A feature of soils in arid and deserted regions is that they have almost the same dielectric constant, with only a slight difference in specific attenuation due to low water content. Soils with

possible typical models of changes in the dielectric constant of the soil along the depth are considered.

Key words: georadar, unmanned aerial vehicle, soil of arid regions, search for underground waters, electrophysical characteristics of soil, required potential of georadar.

Введение

Подземные воды – это ценные ископаемые ресурсы, особенно в засушливых районах Земного шара. Монголия – страна Центральной и Восточной Азии, в которой стоит проблема нехватки питьевой воды, особенно в её южных пустынных районах. Масштабные исследования подземных водных ресурсов Монголии проводились периодически в 1960-х, 1970-х, 1980-х, 1996 и самые последние исследования и поиски были проведены в 2011 году. Основываясь на этих исследованиях на территории Монголии известно 207 источников подземных вод. Однако, интенсивное развитие экономики и природопользования требуют проведения современного полномасштабного исследования по определению объема и мощности водных ресурсов, что свидетельствует об актуальности предлагаемой темы [1, 2]. По сведениям ранее проведенных поисково-исследовательских работ были обнаружены подземные водные ресурсы в различных тектонических породах (рис.1).

Нас особенно интересует поиск подземных водных ресурсов в южных засушливых и пустынных местностях страны, в которых, во-первых, наземные водные ресурсы очень малы, во-вторых, именно из-за структуры почвы, в которых преобладают слабо уплотненные песчаники, пески, рыхлые и плотные конгломераты, угли, алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы, имеющие малое значение удельного затухания для радиоволн.

В районах 3б, 3в и 3г водоносные слои ожидается обнаружить на глубине нескольких метров, что позволит использовать метод подповерхностного радиолокационного зондирования для поиска водоносных горизонтов [3]. Поскольку предстоит обследовать протяженные территории, предполагается установить георадар на беспилотном летательном аппарате (БПЛА).

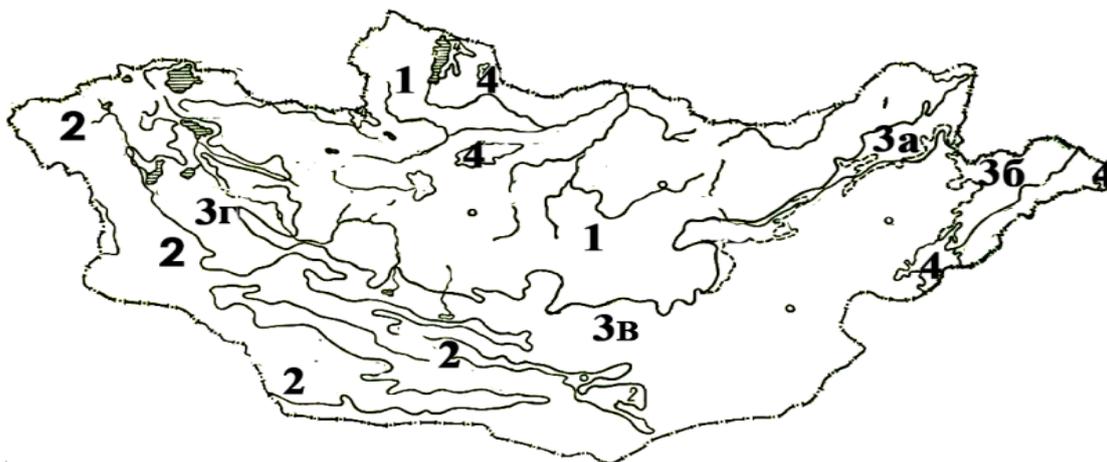


Рис.1. Схема гидрогеологического районирования Монголии.

Гидрогеологические районы: 1 – распространения грунтовых вод Хангайско-Хэнтэйской горной области; 2 - распространения грунтовых вод Монгольско-Алтайской и Гоби-Тянь-Шаньской горной области, распространения артезианских вод межгорных котловин с участками развития грунтовых вод на положительных межкотловинных структурах: 3а – Чойбалсанский, 3б – Тамцагский, 3в – Гобийский, 3г – котловины Больших озер; 4 – наложенных структур кайнозойских плато-базальтов.

По данной тематике можно отметить ряд международных научных публикаций [4-7]. В основном эти публикации были, посвящены зондированию ледяных покровов. Ледяные покровы в пределах разрешающей способности локатора можно рассматривать как однородную среду с малым изменением диэлектрической проницаемости, также ледники имеет слоистую структуру из-за многолетних накоплений, но при этом их электрофизические свойства, в том числе диэлектрические свойства, почти постоянны, и близки по значению к сухому почвогрунту. Поэтому можно ожидать, что возможно обнаружение водоносных горизонтов в пустынных и засушливых местах с помощью георадара, установленного на БПЛА

1. Среда распространения зондирующего сигнала

Пласты земли, изобилующие пустотами и служащие для скопления воды, называются водоносными пластами. Смотря по характеру пустот, в которых образуется, собирается и движется подводная вода, гидрогеологические и другие свойства водоносных пластов бывают различны.

Можно различать следующие категории водоносных пластов [8]:

1. Пустоты рыхлых обломочных или зернистых пород. Промежутки между отдельными зернами таких пород образуют как бы систему сосудов, и собирающаяся в них вода представляет собой не одно общее сплошное капельно-жидкое тело, а массу отдельных водяных нитей или струй, которые находятся в гидродинамической связи между собой. Пустоты, заключенные в зернистой массе водоносного пласта, называются порами, а образующаяся в такой пористой массе подземная вода называется грунтовой водой.

2. Пустоты в твердых сплошных горных породах представляют собой трещины, провалы и пещеры и служат бассейнами для подводной воды. В таких бассейнах подземная вода представляет собой одно сплошное капельно-жидкое тело, подобное поверхностным водотокам, и называются они подземными водотоками.

Разница между грунтовыми и подземными водотоками иллюстрируется рис. 2. Если все сечение канала А наполнено только водой, и канал этот лежит под землей, то мы имеем подземный водоток. Если сечение канала В наполнено песком, гравием или галькой, в которых движется подземная вода (см. рис.2), то это грунтовая вода.

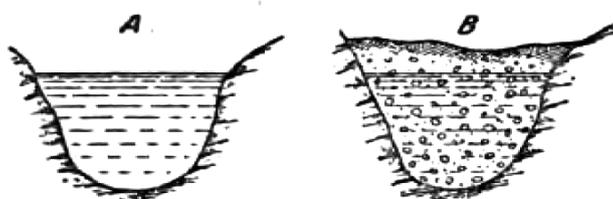


Рис. 2. Схематическое изображение разницы между подземным водотоком и грунтовой водой.

Если вода в обоих каналах находится в движении, то не трудно понять, что гидравлические процессы в потоках А и В различны. В потоке А трение, испытываемое водой при движении, ограничивается только трением воды о стенки каналов, в то время как в потоке В к этим наружным сопротивлениям прибавляются еще сопротивления внутренние, обуславливаемые массой зернистого материала, наполняющего канал и задерживающего движение воды.

Относительное сильное сопротивление течению грунтовой воды в водоносном пласте отражается также и на форме зеркала грунтовых вод. Под влиянием сопротивления водоносного грунта зеркало грунтовой воды образует довольно правильные поверхности, формы которых подвергаются только очень незначительным изменениям.

В подземных водотоках их водные зеркала ничем не отличаются от зеркал водотоков поверхностных. Необходимо подчеркнуть, что канал А может быть частично или полностью заполнен водотоками.

Учитывая выше сказанное, возможные типичные равновесные модели изменения диэлектрической проницаемости грунта, в котором на определенной глубине находится зеркало грунтовой воды, показанные на рис 3.

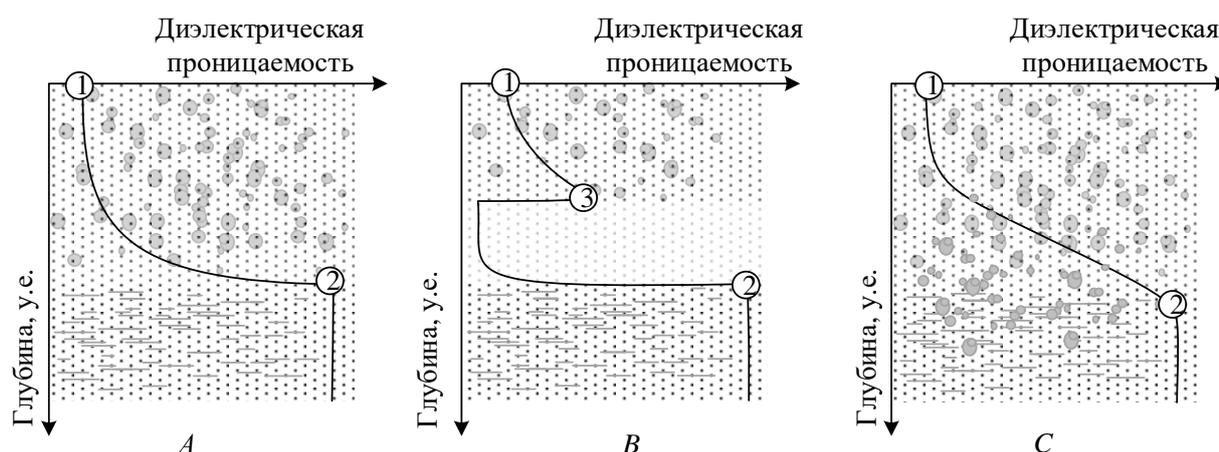


Рис. 3. Возможные типичные равновесные модели изменения диэлектрической проницаемости грунта: А – модель грунта с неполным водотоком канала, В – модель грунта с полным водотоком канала, С – модель с грунтовой водой.

На рис. 3 сплошной линией показано возможное изменение диэлектрической проницаемости. Точка 1 принадлежит поверхности Земли и для сухих грунтов различного типа диэлектрическая проницаемость почти всегда одинакова и равна 2 – 3.

Изменение диэлектрической проницаемости с глубиной зависит от типа пород, составляющих грунт, от сезона, температуры и т.п. На рис. 3 показано условное изменение диэлектрической проницаемости с глубиной и в точке 2

находится зеркало грунтовой воды и значение диэлектрической проницаемости составляет примерно 80.

Когда сечение канала В на рис. 2 частично заполнено водой, то между зеркалом водотока и водоупорным твердым грунтом возникает пустота, в которой значение диэлектрической проницаемости близко к 1.

Как было указано выше, значение диэлектрической проницаемости сухих грунтов почти одинаково, поэтому в засушливых районах грунт можно считать однородным почти до уровня воды. Эту ситуацию можно было бы ожидать для большей части промежуточной зоны в грунте после длительного периода без дождя в засушливых районах. При этом профиль содержания влаги, который непосредственно оказывает влияние на значение диэлектрической проницаемости однородной почвы, будет находиться выше уровня воды.

Для песчаной почвы на участке кривой с малой влажностью («сухая область» кривой) можно отметить почти постоянное низкое содержание влаги, связанное с крутым участком кривой, см. рис.3 В. Однако характеристика влажности для почвы, имеющей более высокое содержание глины, может не иметь такой крутой характеристики, и изменяться более плавно, см. рис.3 А, поэтому будет принят сигнал, отраженный только от водоупорного слоя. Протяженный по глубине переходной слой, насыщенный влагой до зеркала воды является согласующим, его диэлектрическая проницаемость плавно меняется и отраженный сигнал будет слабым, например, рис.3 С. Плавные переходы между слоями грунта оказывают согласующее действие, что приводит к уменьшению отражений на границах [9].

Таким образом, наличие достаточно толстого переходного экспоненциального (по изменению диэлектрической проницаемости) слоя приводит к потере информации о внутреннем строении рассматриваемой структуры. Также, наоборот, если существует весьма тонкий переходный слой, отражение радиоволн от рассматриваемой системы должно быть практически таким же, как и при отсутствии переходного слоя.

Рассмотрим влияние влажности на электрофизические характеристики грунта. В [10] приведены результаты измерения электрофизических свойств различного грунта на разных частотах в условиях изменения температуры и влажности. Из этих данных, очевидно, что при изменении влажности от 0 до 30-35% реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости грунта почти линейно растет, а мнимая часть меняется слабо, рис.4 и рис.5. Но при дальнейшем увеличении влажности имеется резкий рост значений как реальной, так и мнимой части диэлектрической проницаемости, и особенно для грунта глинистого типа.

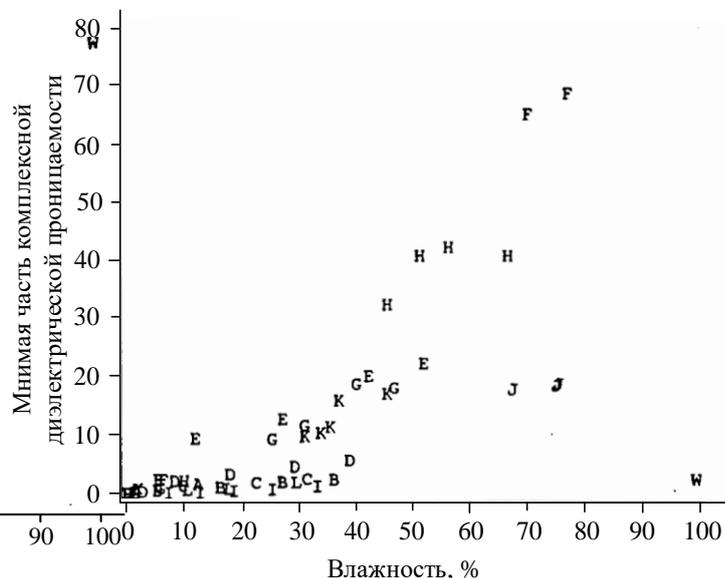
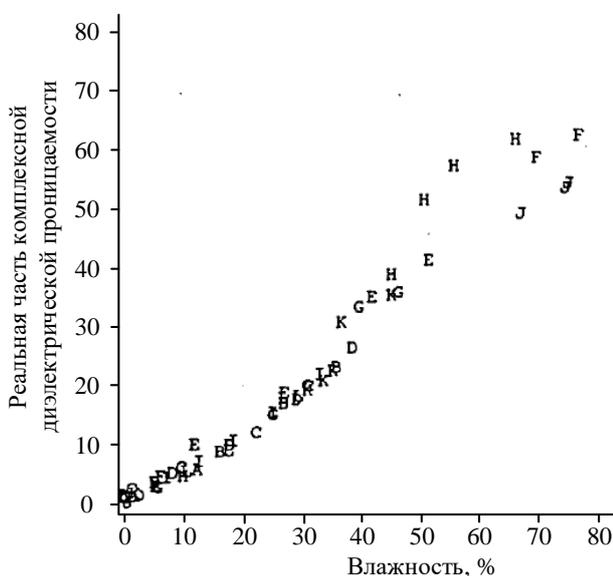


Рис. 4. Зависимость реальной части комплексной диэлектрической проницаемости различных грунтов от влажности на частоте 78МГц и температуре 20⁰С.

Рис. 5. Зависимость мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости различных грунтов от влажности при частоте 78МГц и температуре 20⁰С.

*Обозначения буквами на рисунках 4 и 5 соответствуют данным табл. 1

В таблице 1 приведена информация о грунтах, значения комплексной диэлектрической проницаемости которых показаны на рис.4 и 5.

Таблица 1. Описание грунтов (см. рис. 4 и рис. 5).

Обозначение грунта	Тип грунта	Процент по весу		
		Песк а	Ила	Глин ы
А	Глина, светло-серый	2	22	76
В	Песок, светло-серый	98	2	0
С	Илистый песок, Бурый	88	8	4
Д	Илистый песок, красновато-коричневый	77	9	14
Е	Илистая глина, Бурая	-	93	7
Ф	Глина, серая	1	48	51
Г	Глинистый песок, Темно-коричневый	55	32	13
Н	Глина, серая	2	64	34
І	Песок, белый	100	0	0
Ј	Ил, белый	0	46	54
К	Илистая глина, Бурая со следами песка	4	89	17
Л	Песок, коричневый	99	1	0

Поэтому считаем, что модели, приведенные на рис. 3, соответствуют действительности и для них проведём расчет энергетического потенциала георадара.

2. Энергетический потенциал, требуемый от георадара

В геолокации, кроме значительного затухания сигнала в грунте, существует проблема априорной неопределённости электрофизических характеристик среды распространения. Но в случае сухого грунта, его диэлектрическая проницаемость почти для всех видов грунта является примерно одинаковой. Это обстоятельство позволяет нам считать грунт

засушливой и пустынной местности для зондирующего сигнала примерно однородным даже, если почва состоит из нескольких слоев. Но, если целью зондирования является подповерхностный водоносный слой, то будет иметь место плавный переходной слой грунта из-за связанных вод, которые будут над водоносным горизонтом.

Анализ энергетических характеристик принимаемого сигнала для различных условий функционирования радиолокатора подповерхностного зондирования является важным этапом проектирования и во многом определяет как выбор параметров георадара, так и значения его характеристик и показателей качества.

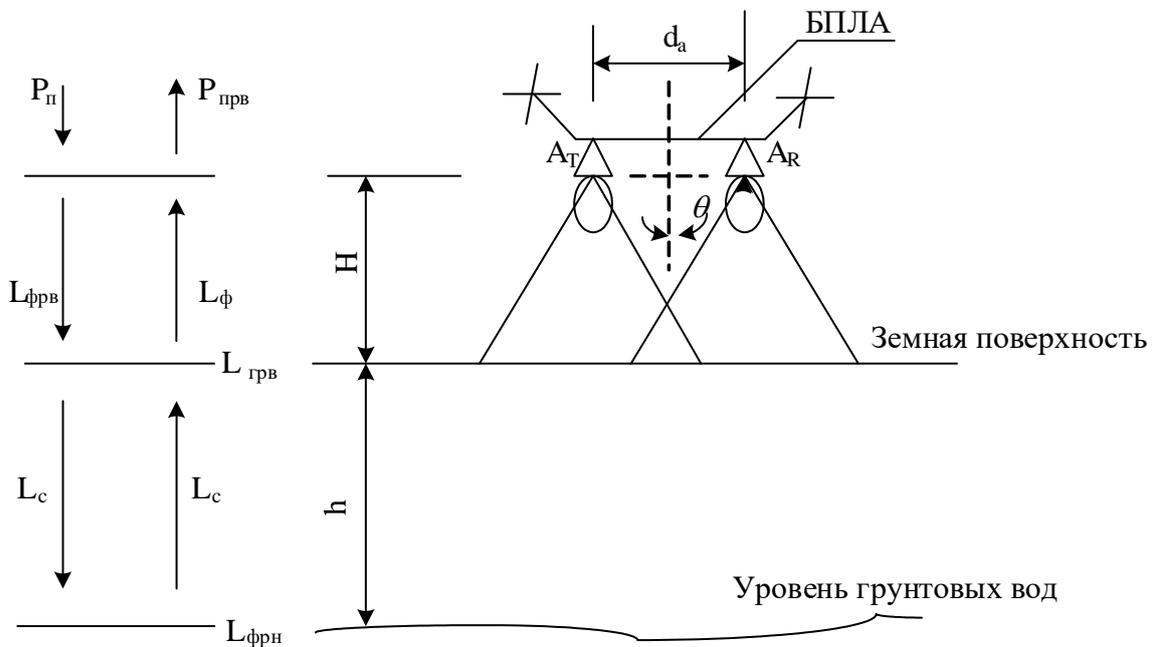


Рис. 6. Геометрическая постановка задачи.

Для расчета энергетических характеристик георадара рассмотрим геометрическую постановку задачи дистанционного зондирования, приведенную на рис. 6 и пусть этот случай соответствует модели А на рис. 3. При этом считаем, что передающая и приемная антенны отстоят друг от друга в горизонтальной плоскости на минимальное расстояние d_a и находятся на высоте H над поверхностью грунта. В качестве «цели» дистанционного зондирования будем рассматривать, расположенную на глубине h относительно

верхней границы грунта: шероховатую границу раздела двух слоев с известными электрофизическими характеристиками.

Радиолокационное уравнение для подповерхностного зондирования учитывает всевозможные потери, которые могут возникать при распространении сигнала в грунте, такие как потери за счет расхождения фронта волны при зондировании с высоты H , потери на границах, потери в среде, потери из-за дефокусировки и т.д.

Применительно к рассматриваемому случаю дистанционного зондирования в диэлектрической среде с потерями уравнение радиолокации может быть записано в следующем виде:

$$P_R = P_T \cdot G_{A1} \cdot g_1 \cdot \tilde{L}_{A1} \cdot \frac{\tilde{L}_{t1} \tilde{L}_{B1} \tilde{L}_{h1}}{4\pi R_1^2} \cdot L_{fk} \cdot \tilde{L}_{tg} \cdot \frac{\tilde{L}_{t2} \tilde{L}_{B2} \tilde{L}_{h2}}{4\pi R_2^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{A2}}{4\pi} \cdot g_2 \cdot \tilde{L}_{A2} \cdot L_{dfk} \quad (1)$$

где P_T и P_R соответственно мощность передатчика и принимаемая мощность; G_{A1} , G_{A2} - коэффициенты направленного действия приемной и передающей антенн, а g_1 , g_2 - нормированные диаграммы направленности антенн (ДНА);

$\tilde{L}_A = \tilde{L}_{A1} \cdot \tilde{L}_{A2}$ - потери в передающем и приемном антенно-фидерных трактах георадара; $\tilde{L}_t = \tilde{L}_{t1} \cdot \tilde{L}_{t2}$ - потери при распространении через слой воздуха;

$\tilde{L}_B = \tilde{L}_{B1} \cdot \tilde{L}_{B2}$ - потери, связанные с отражением от границы раздела воздух – грунт – воздух и грунт-подземный водоносный отражающий слой; $\tilde{L}_h = \tilde{L}_{h1} \cdot \tilde{L}_{h2}$

- потери при распространении электромагнитной волны в грунте; \tilde{L}_{tg} - потери, связанные с отражением зондирующего сигнала от границы водораздела двух слоев при дистанционном зондировании; L_{fk} - выигрыш из-за фокусировки при переходе границы раздела воздух-грунт; L_{dfk} - потери из-за дефокусировки при переходе границы раздела грунт-воздух;

Наклонные дальности в первом приближении считаем равными $R_1(\theta, \varphi) \approx R_2(\theta, \varphi) \approx H$.

Потенциалом георадара принято называть

$$p[\text{дБ}] = 10\lg\left(\frac{P_T}{P_{R\min}}\right) = L_A + L_t + L_B + L_h - L_{fk} + L_{dfk} + L_{Tg}. \quad (2)$$

Если уравнение радиолокации представить в логарифмической форме, то просуммарные потери в канале дистанционного зондирования выражаются в децибелах (дБ) [11, 12]:

- потери в антенно-фидерном тракте георадара

$$L_A = L_{A1} + L_{A2}, \quad (3)$$

- потери распространения

$$L_t = 10\lg\left(\frac{(4\pi)^3 \cdot R_1^2 R_2^2}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 g_2}\right) \approx 10\lg\left(\frac{(4\pi)^3 \cdot H^4}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 g_2}\right), \quad (4)$$

- потери, связанные с отражением от границы раздела воздух-грунт-воздух (Вз-Гр) и грунт-подземный водоносный отражающий слой (Гр-Ос):

$$L_B = L_{B1} + L_{B2}.$$

$$L_{B1} = -20\lg R_{Bz-Gr}, \quad (5)$$

$$L_{B2} = -20\lg R_{Gr-Oc} - 20\lg|1 - R_{Bz-Gr}^2|, \quad (6)$$

где R_{Bz-Gr} - коэффициент отражения воздух-грунт; R_{Gr-Oc} - коэффициент отражения грунт-подземный отражающий слой;

L_h - потери из-за затухания электромагнитной волны при распространении в среде с потерями на расстоянии h

$$L_h = 10\lg\left(8.686 \cdot h \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon'(h)}{2} (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)}\right) \quad (7)$$

где ε' - вещественная часть диэлектрической проницаемости грунта, $\text{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь грунта,

L_{fk} - выигрыш из-за фокусировки при переходе границы раздела воздух-грунт

$$L_{fk} = 20\lg\left(\frac{H + h}{H + h/\text{Re}\sqrt{\varepsilon}}\right) \quad (8)$$

L_{dfk} - потери из-за дефокусировки при переходе границы раздела грунт-воздух

$$L_{dfk} = 20 \lg \left(\frac{H + h}{h + H \cdot \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon}} \right) \quad (9)$$

Поскольку целью георадара является подземный отражающий слой - поверхность подземного водотока, то потери, связанные с отражением зондирующего сигнала учитываются потерями на границах.

Разработанные методики и программное обеспечение позволяют рассчитывать базовые энергетические характеристики георадара подповерхностного зондирования: мощность на входе приемника сигнала, отраженного от подповерхностных аномалий, энергетический потенциал и отношение сигнал-шум, мощность сигнала от верхней границы грунта и т.п. На основе этих характеристик рассчитывается максимальная глубина зондирования, которая может быть представлена, как функция различных переменных (энергетического потенциала радара, затухания в грунте, электрофизических характеристик грунта и т.д.).

Рассмотрим пример расчета потенциала георадара по обнаружению водоносных слоев для трех моделей, приведенных на рис.3.

Хорошо известно, что глубина зондирования радиолокационного сигнала увеличивается с уменьшением его несущей частоты, но с другой стороны, разрешающая способность по глубине зависит от ширины спектра сигнала и, кроме этого, с уменьшением частоты размер антенны увеличивается. Это нежелательно, поскольку георадар находится на борту БПЛА. Для расчетов выбираем широкополосный зондирующий сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при двух возможных значениях:

$$1) f_0 = 75 \text{ МГц}, \quad \Delta f_c = 60 \text{ МГц};$$

$$2) f_0 = 200 \text{ МГц}, \quad \Delta f_c = 160 \text{ МГц}.$$

Для модели А на рис.3, до согласующего переходного слоя даже слоистый грунт можно считать однородным, потому что диэлектрические проницаемости слоёв близки по значению. Переходным или водоупорным слоем могут

служить более твердые породы или даже скалистый слой, в котором существует подземный водоток и вода находится в движении. Расчет требуемого потенциала для данной модели среды представлен на рис. 6а и рис. 6б.

В переходном слое происходит рост диэлектрической проницаемости и скорость или крутизна этого роста сильнее всего сказывается в случае, когда в грунте содержится песок, поэтому за счет этого явления требуемый потенциал резко возрастает при достижении поверхности вод.

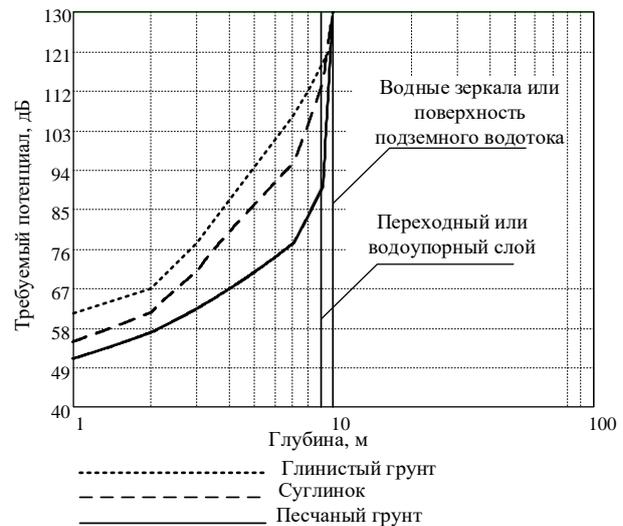
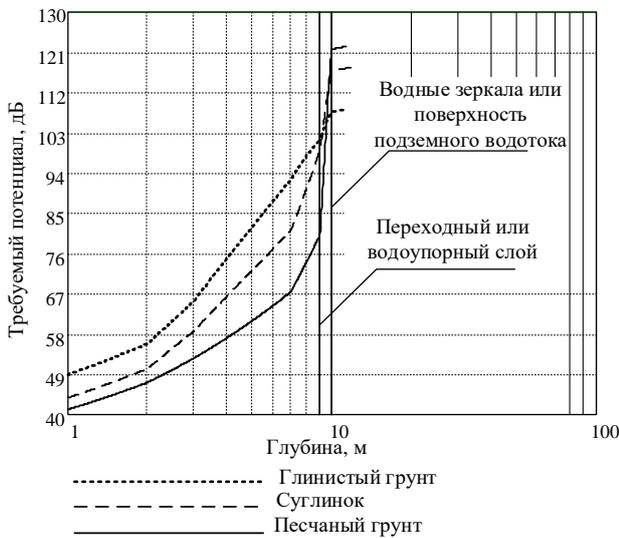


Рис. 6а. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на разделе двух сред при толщине согласующего слоя $h = 0,3\text{м}$ на частоте 75 МГц . При этом считаем, что влажность в согласующем слое резко растёт от 30 до 80-90 процентов и соответственно, комплексная диэлектрическая проницаемость растёт (см.рис. 4).

Рис. 6б. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на разделе двух сред при толщине согласующего слоя $h = 0,3\text{м}$ на частоте 200 МГц . При этом считаем, что влажность в согласующем слое резко растёт от 30 до 80-90 процентов и соответственно, комплексная диэлектрическая проницаемость растёт. (см.рис. 4).

Рассмотрим модель В грунта на рис. 3, где промежуточным слоем является, воздушный зазор между водоупорным твердым (скальным) грунтом и поверхностью подземного водотока, см. рис.7. В этом случае часть сигнала, которая проникает (точка 1) в грунт, частично отражается от границы «грунт-

воздушный зазор» и распространяется к поверхности (точка 2), другая часть сигнала распространяется ниже до поверхности подземного водотока и отражается от нее. При распространении вверх эта часть отраженного от поверхности подземного водотока сигнала отражается от границ слоев и выходит наружу (в точке 3). Таким образом, для этой модели получается многократное отражение и для расчета потерь, на границах слоев эти отражения необходимо учитывать. Пунктирной линией на рис.7 показаны сигналы вторичного отражения.

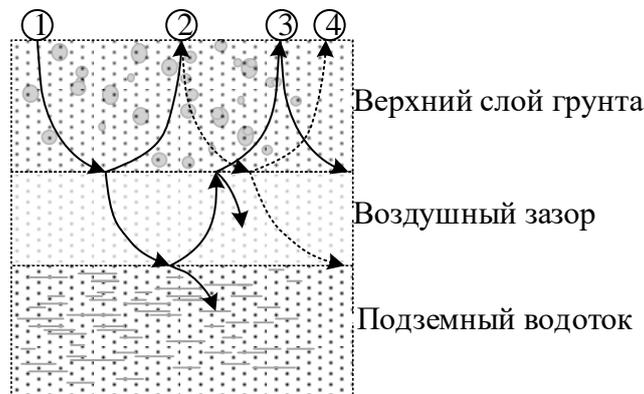


Рис. 7. Пути распространения сигнала в многослойном грунте.

Коэффициент отражения такой среды может быть записан следующим образом [12]:

$$\dot{R} = \frac{\dot{R}_{B3-\Gamma} + \dot{R}_{\text{Э}} \exp(-2\dot{\gamma}_2 h_2)}{1 + \dot{R}_{B3-\Gamma} \cdot \dot{R}_{\text{Э}} \exp(-2\dot{\gamma}_2 h_2)}, \quad (9)$$

где $\dot{R}_{\text{Э}} = \frac{\dot{R}_{\Gamma-B3} + \dot{R}_{B3-\text{Вода}} \exp(-2\dot{\gamma}_3 h_3)}{1 + \dot{R}_{\Gamma-B3} \cdot \dot{R}_{B3-\text{Вода}} \exp(-2\dot{\gamma}_3 h_3)}$, γ - постоянная распространения, h_2 - толщина грунта, h_3 - толщина воздушного зазора.

Кроме того, в данном случае целью георадарного поиска будет не граница раздела слоев, а поверхность подземного водотока. На рис. 8 глубина состоит из толщины слоя грунта и толщины воздушного зазора. Слой грунта состоит из начального песчаного грунта и водоупорного скального грунта, имеющего близкие электрофизические характеристики.

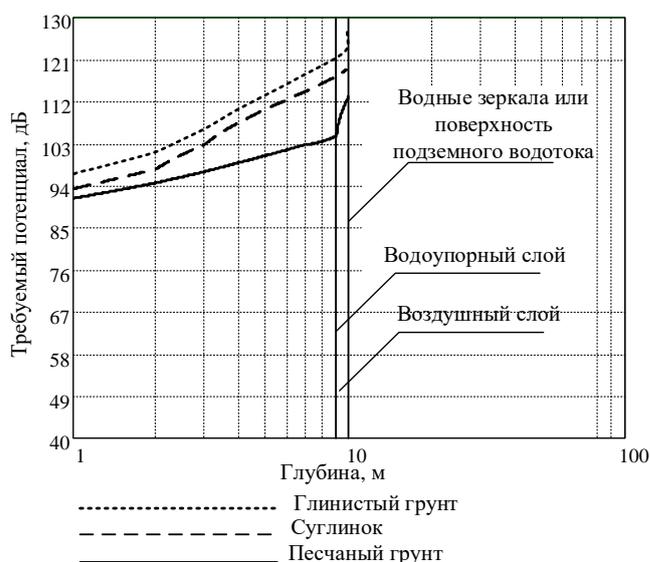
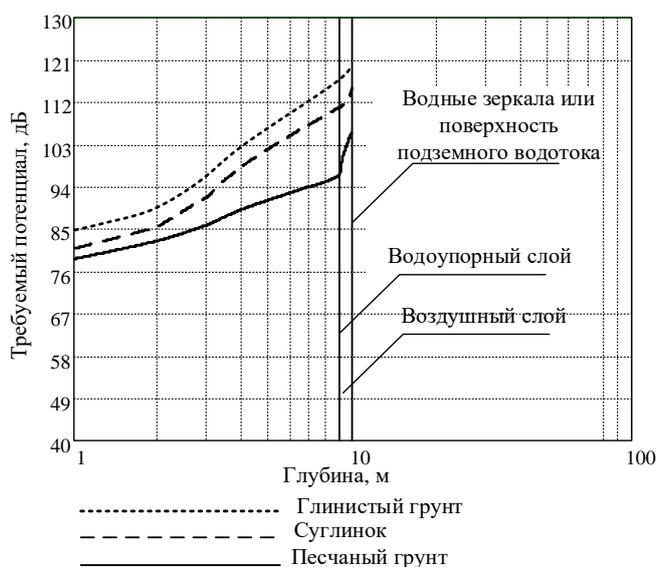


Рис. 8а. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на разделе двух сред при толщине воздушного слоя $h = 1.0\text{м}$ на частоте 75 МГц/

Рис. 8б. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения водоносного слоя на разделе двух сред при толщине воздушного слоя $h = 1.0\text{м}$ на частоте 200 МГц/

На требуемый потенциал георадара значительное влияние оказывает толщина и электрофизические параметры согласующего слоя с повышенным содержанием связанных и свободных вод. Очевидно, что с ростом толщины согласующего слоя требуемый потенциал растет, но при уменьшении согласующего слоя влияют, главным образом, потери в верхнем слое.

Рассмотрим третий случай, модель С грунта на рис. 3, когда не существует водоупорного грунта, а подземная вода находится в виде пористой грунтовой массы называемой грунтовой водой. При этом считаем, что диэлектрическая проницаемость грунта растет линейно за счет капиллярных вод и тогда весь слой является согласующим и от георадара требуется существенно больший потенциал.

В реальности раздел между средой грунта и водой может быть не плоским, а шерховатым, тогда эффективная площадь рассеяния зависит от степени шерховатости. Пока неровности не слишком велики, как и для гладкой поверхности, волна формируется областью, приблизительно соответствующей первой зоне Френеля. Для нормального закона распределения ординат

неровностей поверхности среднееквадратическое значение коэффициента отражения при угле падения θ определяется формулой [13]:

$$\overline{R_s^2}(\theta) = R(\theta) \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sigma_h \cdot \cos\theta\right)^2\right), \quad (10)$$

где $R(\theta)$ - модуль коэффициента отражения Френеля для гладкой поверхности, σ_h - среднееквадратическое значение ординат неровностей.

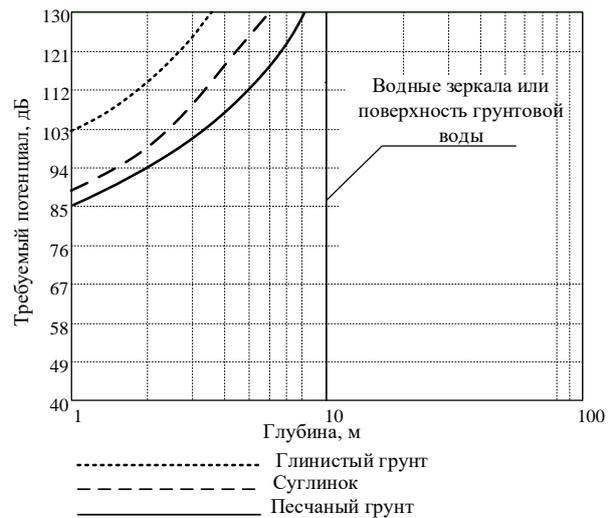
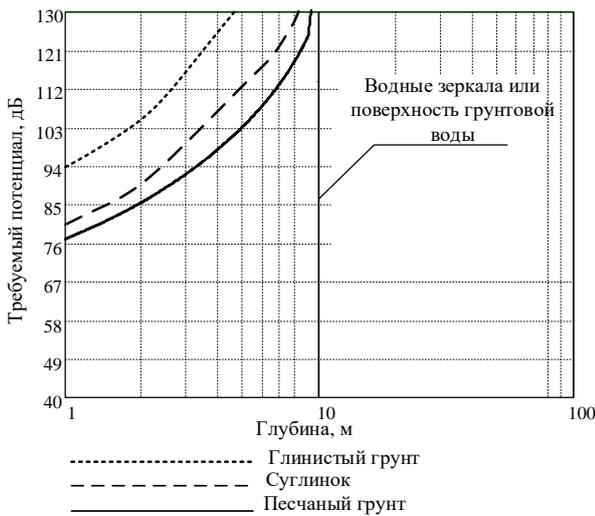


Рис. 9а. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения уровня грунтовой воды на частоте 75 МГц

Рис. 9б. Требуемый от георадара потенциал для обнаружения уровня грунтовой воды частоте 200 МГц

Граница между областями применения закономерностей для гладких и шероховатых поверхностей определяется критерием Релея. Допустимые среднееквадратичные ординаты неровностей граничного слоя поверхности должна отвечать условию

$$\sigma_{h\max} \leq \lambda_c / 16 \cos\theta, \quad (11)$$

где длина волны в грунте зависит от его электрофизических характеристик и рассчитывается по формуле $\lambda_c = \lambda / \text{Re} \sqrt{\epsilon}$. При этом высота неровностей, с которой границу раздела можно считать шероховатой, должна быть больше 0,14м и 0,05м например, для сухой песчаной почвы и для частот 75МГц и 200МГц, соответственно. Если шероховатость такого порядка на границе

раздела с водоносным слоем будет присутствовать, то это также повлияет на потенциал георадара.

Так как антенны, применяемые при подповерхностном зондировании, характеризуются низкой направленностью, то при зондировании поверхности с повышенной шероховатостью в метровом диапазоне возможны интенсивные паразитные отражения от поверхности, превышающей первую зону Френеля, рис. 10. Отражения от элементов шероховатого рельефа маскируют более слабые отражения от подповерхностных слоев. Разрешающая способность георадара по продольным координатам определяется шириной луча, который в свою очередь зависит от эффективной площади антенны, определяемой ее апертурой. Возможность увеличения апертуры увеличением геометрических размеров антенны для георадаров на БПЛА сильно ограничены, поэтому применяются методы синтеза апертуры, основанные на обработке отраженных сигналов, полученных при движении носителя радара над поверхностью вдоль трассы зондирования, рис. 10.

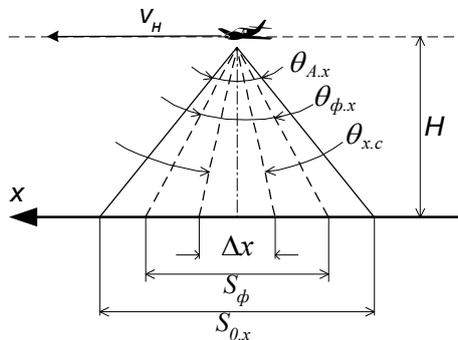


Рис. 10. Геометрия задачи синтеза апертуры антенны вдоль координаты x при зондировании в надир.

На рис.10 показаны три характерных зоны на земной поверхности: $S_{0,x}$ – пятно облучения, определяемое шириной диаграммы $\theta_{A,x}$, формируемой антенной радара; S_ϕ – зона Френеля, от которой в основном принимаются отраженные сигналы, диаметр зоны Френеля $S_\phi = \sqrt{\lambda H}$; Δx – собственно элемент разрешения по координате x , формируемый синтезированной диаграммой антенны $\theta_{c,x}$. Конечно, под поверхностью все эти диаграммы

несколько искажаются из-за эффектов фокусировки и расфокусировки в подповерхностных слоях, однако, в первом приближении этими эффектами можно пренебречь.

Для организации георадара на борту БПЛА хорошо подходит алгоритм доплеровской фильтрации отраженных сигналов [14]. Влияние паразитных отражений от рельефа можно уменьшить фильтрацией нулевых доплеровских частот. Принцип сужения диаграммы ясен из рис. 11.

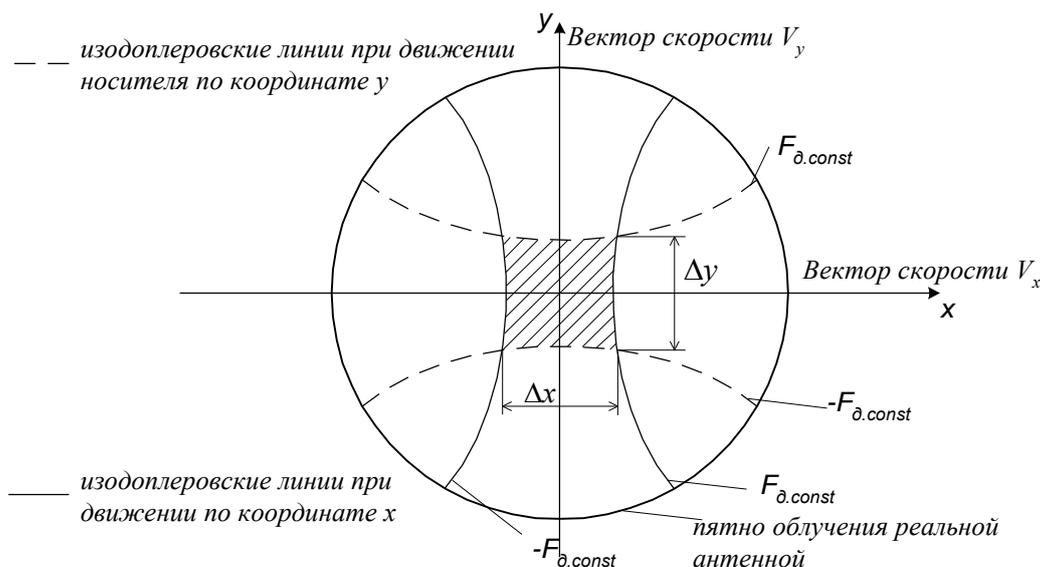


Рис. 11. Геометрия задачи синтеза узкой диаграммы направленности антенны по координатам x , y .

Задача может быть упрощена, если выполнять съемку и обработку сигналов отдельно по координатам x и y . При этом обследование территории производится в два этапа по оси x , затем по оси y . Трассы обследования по x должны выбираться так, чтобы элементы разрешения (заштрихованная область) соприкасались по элементам Δy , соответственно трассы обследования по y выбирается так, чтобы элементы разрешения по x соприкасались. Для успешной работы трассы обследования должны привязываться к координатам поверхности и контролироваться. Для этого существует современные достаточно точные системы местоопределения.

На рис. 12 показаны график изменения доплеровской частоты по одной координате и частотная характеристика фильтра нулевой доплеровской частоты.

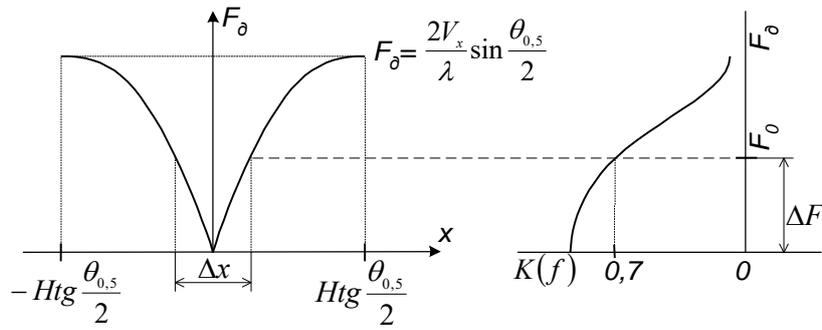


Рис. 12. График изменения F_d и полоса доплеровского фильтра.

Фильтрация несущей принимаемых сигналов, осуществляемая доплеровским фильтром с полосой пропускания $\Delta F \approx F_0$, ограничивает область приема сигналов, отраженных поверхностью зондируемой среды вдоль оси x , участков Δx . Это эквивалентно сужению диаграммы направленности используемой антенной системы в плоскости ZOX до значения

$$\theta_{\text{эф}} = 2 \arctg \frac{\Delta x}{2H} \cong \Delta x \cdot H, \quad (12)$$

где H – высота зондирования. В частности, если Δx выбирается равным диаметру первой зоны Френеля $\Delta x = \sqrt{H\lambda_0}$, то $F_0 = V_x / \sqrt{\lambda_0 H}$. Разрешение Δx_H по нижней границе слоя (считая верхней границей поверхности) изменяется на некоторую величину $\delta\Delta x = \Delta x_H / \Delta x$, которая зависит от ε грунта и от отношения h/H .

Заключение

В данной работе рассчитан требуемый энергетический потенциал георадара для поиска водоносных слоев в засушливых районах с борта БПЛА. В этих районах характерны сухие грунты, а водоносный горизонт и грунт разделяется в основном слоем влажной глины и базальта. В статье рассмотрены три типичные модели водоносных слоев в грунте и для них проведены расчеты требуемого потенциала георадара для поиска грунтовых вод. Для селекции отражений от элементов шероховатого рельефа маскирующих более слабые отражения от подповерхностных слоев предлагается применение алгоритма

доплеровской фильтрации отраженных сигналов, полученных при движении БПЛА с георадаром над поверхностью земли вдоль трассы зондирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерством культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-57-44001.

Литература

1. Цыренова Т.Б. Политико-правовые аспекты охраны водных ресурсов в Монголии. *Власть*. 2010. №12. С.169-172.
2. Цыренова Т.Б. О системе управления водными ресурсами в Монголии. *Власть*. 2011. №7. С.97-100.
3. Маринов Н.А., Попов В.Н. *Гидрогеология Монгольской народной республики*. Москва, Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. 1963. 431 с.
4. Church G.J., Bauder A., Grab M., Hellmann S., Maurer H. High-resolution helicopter-borne ground penetrating radar survey to determine glacier base topography and the outlook of a proglacial lake. *17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441598>
5. Grab M., Bauder A., Ammann F., Langhammer L., Hellmann S., Church G.J., Schmid L., Rabenstein L., Maurer H.R. Ice volume estimates of Swiss glaciers using helicopter-borne GPR — an example from the Glacier de la Plaine Morte. *17--th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441613>
6. Langhammer L., Rabenstein L., Bauder A., Schmid L., Grab M., Schaer P., Maurer H.R. Development of a novel dual-polarization helicopter-borne GPR system. *17-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441574>

7. Bauder A., Mazzotti G., Berger C., Langhammer L., Griessinger N., Jonas T. Winter Accumulation Measurements on Alpine Glaciers using Ground Penetrating Radar. *1-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 18-21 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441559>
8. Всевожский В.А. *Основы гидрогеологии*. Москва, Издательство МГУ. 2007. 448 с.
9. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. О возможности определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радиоизлучению. *Доклады АН СССР*. 1970. Т.94. №6. С.1313–1315.
10. Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J. B. Effect of Soil Composition on Complex Dielectric Properties. *US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station*. 1995. Technical Report EL-95-34.
11. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Engineering and Technology. 2004. 752 p.
12. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1994. 216 с.
13. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. *Радиолокация слоистых земных покровов*. Москва, Советское радио. 1977. 216 с.
14. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. *Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии*. Москва, Недра. 1986. 128 с.

Для цитирования:

Баскаков А.И., Одсурэн Б., Комаров А.А., Тувдендоорж Г. Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №.7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>