

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПОМЕХ НА ПАРАМЕТРЫ ЗОНЫ  
УВЕРЕННОГО ПРИЕМА В СДВ И ДВ ДИАПАЗОНАХ**

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE  
OF THE UNDERLYING SURFACE AND INTERFERENCE  
ON THE PARAMETERS OF THE ZONE OF CONFIDENT RECEPTION  
IN THE VLF AND LF BANDS**

*Канд. техн. наук А.В. Наговицын, В.А. Сафаралиев, А.Н. Наговицына*

*Ph.D. A.V. Nagovitsyn, V.A. Safaraliev, A.N. Nagovitsyna*

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

В работе рассматривается пример решения оптимизационной задачи по выбору месторасположения передающих радиоэлектронных средств (РЭС) в сверхдлинноволновом (СДВ) и длинноволновом (ДВ) диапазонах, которая состоит в поиске такого пространственного (географического) расположения передающих РЭС, при котором площадь зоны уверенного приема максимальна.

Проведенный анализ исследуемых зависимостей показывает, что за счет более рационального географического размещения передающих РЭС, выбора их ТТХ и с учетом существующей помеховой обстановки можно сформировать необходимые зоны уверенного приема сигналов аппаратурой потребителей.

**Ключевые слова:** радиолиния, помехи, зона уверенного приема, подстилающая поверхность, поглощение земной волны.

The paper considers an example of solving the optimization problem of choosing the location of transmitting radio-electronic means (RES) in the ultra-long-wave (VLF) and long-wave (LF) bands, which consists in finding such a spatial (geographical) location of transmitting RES, in which the area of the zone of confident reception is maximal.

The analysis of the studied dependencies shows that due to a more rational geographical location of transmitting RES, the choice of their TTX and taking into account the existing interference situation, it is possible to form the necessary zones of confident reception of signals by consumer equipment.

**Keywords:** radio line, interference, confident reception area, underlying surface, absorption of the earth wave.

Сверхдлиннные радиоволны имеют два решающих преимущества — они, во-первых, способны проникать вглубь морской воды и, во-вторых, могут распространяться на очень большие расстояния, не будучи при этом чувствительными к ионосферным возмущениям. В связи с

этим для обеспечения потребителя устойчивой связью резко возрос интерес специалистов к СДВ и ДВ диапазонам, в которых имеется возможность использовать их для специальной связи различного назначения, глобальной радионавигации и др. [1].

### Обоснование необходимости определения геометрических параметров зон уверенного приема радиосигналов в радиолинии в СДВ и ДВ диапазонах

Последние десятилетия характеризуются быстрым внедрением систем связи работающих в СДВ и ДВ диапазонах, предназначенных для устойчивой передачи подвижным абонентам различного типа информации [2]. Несмотря на независимость параметров радиоканала от состояния атмосферы и ионосферы в пределах территории обслуживания образуется большое число зон, параметры сигнала в которых существенно отличаются. Последнее обусловлено различными условиями распространения со стороны подстилающей поверхности — поглощения энергии электромагнитной волны полупроводящей поверхностью. Геометрические параметры этих зон зависят от многих факторов, в первую очередь от технических характеристик РЭС, пространственного (географического) расположения РЭС и характера земной поверхности на пути распространения электромагнитных волн. Технические факторы, влияющие на размер зоны уверенного приема, — это длина волны, мощность передающих РЭС и чувствительность приемных устройств. Пространственное (географическое) расположение относительно друг друга и относительно источников помех учитывает привязку к карте проводимости почв.

Фундаментальные исследования Зоммерфельда, Вейля и Фока привели к решению задачи распространения электромагнитных волн вдоль плоской и сферической однородной подстилающей поверхности. Обобщением указанных исследований послужили работы Фейнберга, который в своей монографии приводит решение задачи распространения электромагнитных волн вдоль плоских и сферических кусочнооднородных трасс.

Анализ степени влияния различных типов помех на работоспособность РЭС выходит за рамки данного исследования. Поэтому при определении размеров зон уверенного и неустойчивого приема мы будем ориентироваться на заранее определенные характеристики приемной аппаратуры, такие как защитное отношение  $\xi$ , определяющее гарантированную работоспособность, и отношение подавления (в данной статье будем обозначать —  $\chi$ ), определяющее полное

нарушение работоспособности. Эти коэффициенты определяются параметрами приемной аппаратуры, видом модуляции и способом обработки сигнала, в том числе применения помехоустойчивого кодирования [3, 4].

На формирование зон подавления и уверенного приема радиосигналов огромное влияние оказывают как естественные, так и искусственные помехи. Далее в статье все источники полезного и мешающих сигналов будем называть источниками радиоизлучений (ИРИ).

Искусственные помехи — это промышленные помехи и помехи, создаваемые другими радиоэлектронными системами, работающими на тех же частотах что и передающие РЭС рассматриваемой радиолинии. Промышленные помехи (ИП) в СДВ и ДВ диапазонах создаются работой различного типа предприятий (учреждений), линий электропередачи, аэропортов и др. Радиоэлектронные системы, работающие на тех же частотах что и передающие РЭС рассматриваемой радиолинии, могут быть расположены как на территории России, так и за ее пределами. И если проблемы электромагнитной совместимости на территории России в основном решаются, то эти же проблемы с зарубежными ИРИ не решены [5].

Целью данного исследования является разработка и апробация алгоритма определения зон уверенного и нестабильного приема с учетом влияния подстилающей поверхности и выработки предложений по географическому расположению передающих РЭС, их количество и ТТХ для формирования необходимых зон уверенного приема аппаратурой потребителей в условиях воздействия помех.

#### Алгоритм расчета коэффициента ослабления радиосигналов в радиолинии СДВ и ДВ диапазонов за счет поглощения подстилающей поверхностью

Распространение радиоволн в СДВ и ДВ диапазонах характеризуется условиями сферического волновода, состоящего из ионосферы (с высокой проводимостью) и поверхности Земли (проводимость зависит от характера грунта). При этом основным фактором, определяющим дополнительное ослабление, является поглощение электромагнитных волн (ЭМВ) в полупроводящей подстилающей поверхности [6].

Методика определения степени влияния каждого участка подстилающей поверхности на результирующую степень ослабления сигнала изложена в статье «Методика расчета ослабления радиоволн СДВ и ДВ диапазонов с учетом параметров подстилающей поверхности» [7]. Там же рассмотрен математический аппарат построения трассы, соединяющей исходную и конечную точки по кратчайшему расстоянию.

На основе этой методики был разработан алгоритм (рис. 1) и реализовано программное обеспечение для ЭВМ, осуществляющее расчет коэффициента ослабления  $F_{\text{осл}}$  между любыми заданными точками на поверхности Земли.

На рис. 2 представлен пример построения трассы между точкой с координатами  $\varphi_M = 56^\circ$ ,  $\lambda_M = 44^\circ$  и точкой  $\varphi_N = 65^\circ$ ,  $\lambda_N = -15^\circ$ . Различными градиентами серого (в оригинале — различными цветами) обозначены значения проводимости грунта в соответствии со значениями, взятыми

из «Мирового атласа проводимости почв ОНЧ». На рис. 2 видно, что трасса проходит над областями с разными значениями проводимости подстилающей поверхности, в том числе и над соленой морской водой. Необходимо отметить, что дискретной величине, указанной на карте, соответствует диапазон значений [8, стр. 2].

Начальному участку трассы соответствует проводимость грунта 10 мСм/м (реальные значения лежат в диапазоне от 5,5 до 17 мСм/м). Затем идет участок с проводимостью 30 мСм/м (17...55 мСм/м). Проводимость почв Скандинавии — 3 (1,7...5,5) мСм/м. Там же большое количество пресных озер с проводимостью 10 мСм/м. Соленой морской воде соответствует проводимость 4000 мСм/м (4 См/м). Заканчивается радиотрасса на острове Исландия с проводимостью поверхности 30 мСм/м.

Профиль этой трассы представлен на рис. 3. На верхнем графике изображен эллипс суще-

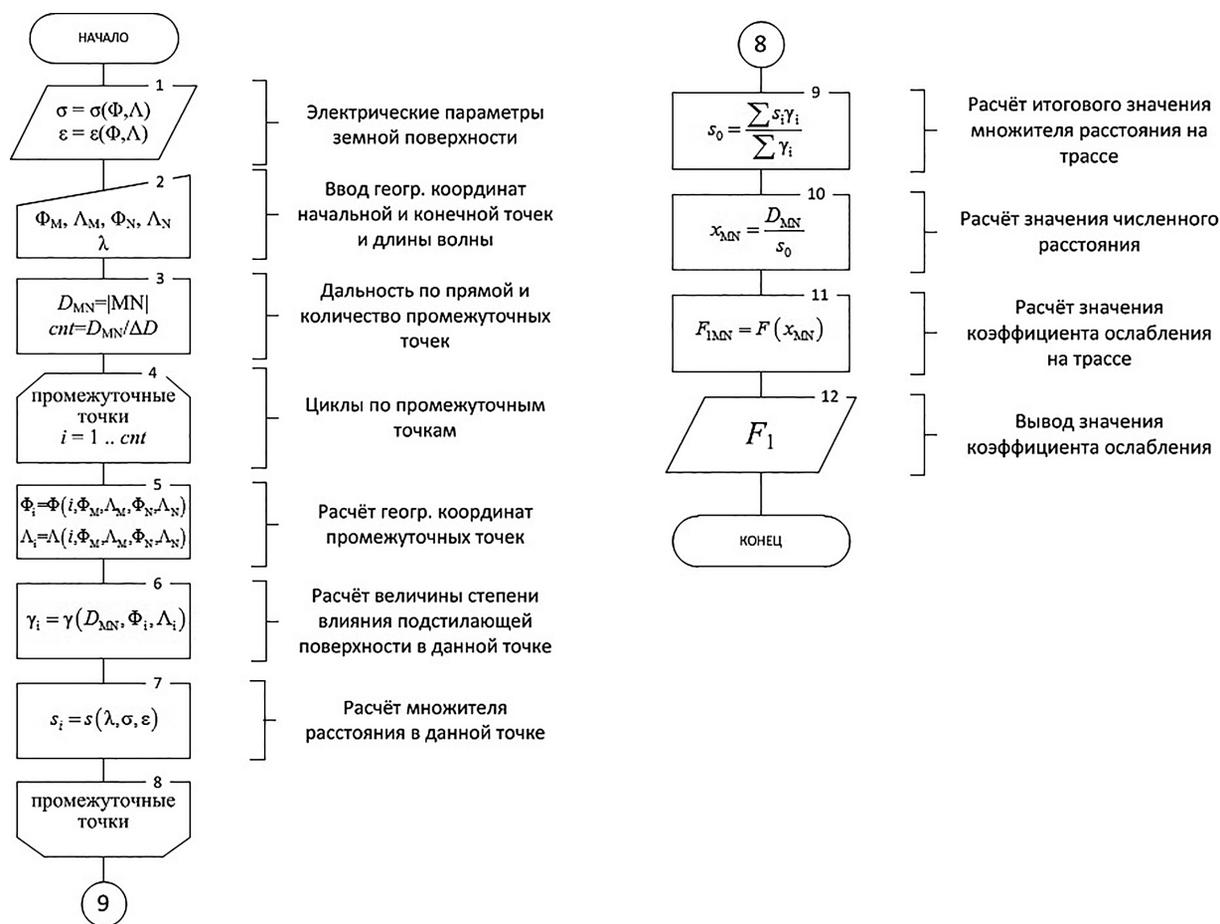


Рис. 1. Алгоритм расчёта коэффициента ослабления электромагнитной волны за счёт поглощения в электрически разнородной подстилающей поверхности

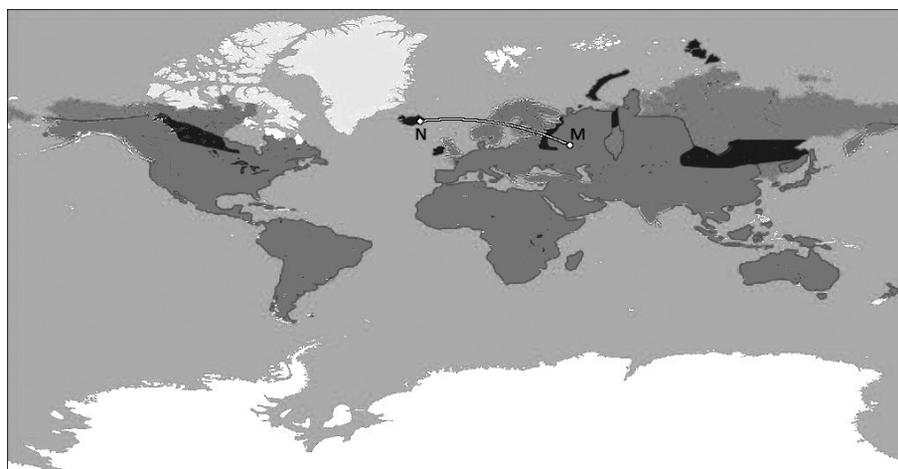


Рис. 2. Пример трассы между точкой М ( $\varphi = 56^\circ, \lambda = 44^\circ$ ) и точкой N ( $\varphi = 65^\circ, \lambda = -15^\circ$ )

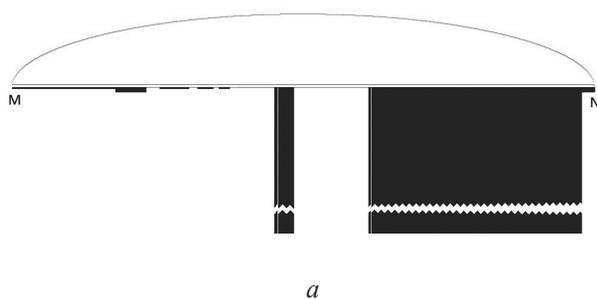
ственной зоны. На поле, расположенном ниже, представлен график величины  $s$  — масштаба расстояний, соответствующий каждой точке трассы. Для участков, соответствующих соленой морской воде, значения величины  $s$  в текущем масштабе выходят за пределы поля и изображены с разрывом.

В нижней части рис. 3 представлены график функции влияния  $\gamma$ , характеризующей долю энергии электромагнитной волны, на которую оказывает ослабляющее действие конкретный участок подстилающей поверхности, и результат перемножения величины множителя расстояния  $s$  на  $\gamma$ .

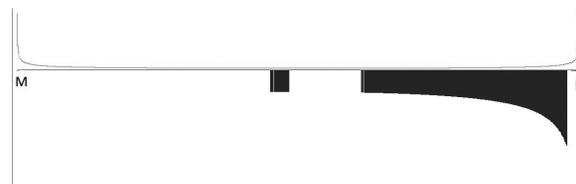
Исходными данными для алгоритма являются сведения о проводимости почв и географические координаты передающей и приемной РЭС.

Информацию о проводимости почвы для диапазонов СДВ и ДВ (соответствуют ОНЧ и НЧ) целесообразно брать в Мировом атласе проводимости почвы, входящем в Рекомендации МСЭ-R P.832-4 [8]. Однако представленные там

черно-белые контурные карты территорий материков со вспомогательной информацией требуют ручного определения величины проводимости почвы для каждой интересующей нас точки. Следовательно, для автоматизации процесса расчета величины затухания эта информация должна быть преобразована к удобному для машинного ввода виду. Последнее осложняется тем, что все линии (в том числе сетка координат и береговая линия) прорисованы толстой полосой без четких границ. Кроме того, прорисовка координатной сетки по серединам указанных линий показывает, что автоматический пересчет географических координат в координаты пикселя карты невозможен, так как шаг линий неравномерный. Поэтому информация о проводимости почв должна быть предварительно подготовлена. Так как наиболее важная граница по проводимости проходит по береговой линии, то принято решение взять за основу карту мира (с детальной прорисовкой береговой линии) и перенести на нее границы осталь-



а



б

Рис. 3. Профиль трассы, отображающий изменения электрических параметров вдоль трассы: высота существенной зоны; масштаб расстояния  $s$ ; функция влияния  $\gamma$ ; величина влияния, равная произведению  $s\gamma$ . Важно: большему значению  $s$  соответствует меньшее ослабление

ных зон. В данной реализации использована карта мира в проекции Меркатора с горизонтальным масштабом 18,77 пикселей на градус (вертикальный масштаб — переменный). Кодирование величины проводимости определяется цветом, а сама карта сохранена в 256-цветном формате, то есть каждый пиксель определяется одним байтом — индексом цвета. Для кодирования используется 12 цветов, соответствующих соленой морской воде, пресной воде, суше с проводимостями 100; 30; 10; ... ; 0,03 мСм/м. Конкретные цвета выбраны удобными для человека, подготавливающего исходные данные. Значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  не определяются, так как для длинноволнового диапазона ( $\lambda > 1000$  м) токи смещения намного меньше токов проводимости и не учитываются.

После ввода географических координат передающей и приемной РЭС производится построение линии, соответствующей кратчайшему расстоянию, и определение промежуточных точек с шагом, определяемым длиной волны и масштабом карты. Промежуточные точки распределяются равномерно на прямой линии, соединяющей передатчик и приемник. При этом проекции на поверхность Земли точек, расположенных ближе к середине отрезка, идут реже, чем у краев. При геоцентральном угле  $\Theta$ , большем 120 градусов, расчет промежуточных точек осуществляется с равным угловым шагом. После определения угловых (географических) координат каждой промежуточной точки, по этим координатам определяется номер пикселя на карте проводимостей почвы и по значению соответствующего байта определяется значение проводимости подстилающей поверхности в конкретной точке.

Для определения степени влияния данного участка подстилающей поверхности на радиоканал необходимо учесть геометрические размеры существенной зоны в данном месте. Высота этой зоны определяется местоположением рассматриваемой точки на трассе и длиной волны. После этого необходимо определить долю энергии, попадающей под ослабляющее действие земной поверхности. В данном исследовании за высоту такого слоя принята половина длины волны. Распределение энергии в сечении существенной зоны соответствует функции Бесселя 1 рода. В результате анализа этого распределения полу-

чена эмпирическая формула зависимости доли (в данной работе обозначена как  $\gamma$ ) энергии в приземном слое. Итоговое значение масштаба расстояния  $s_0$  получаем сложением всех промежуточных множителей с учетом степени их влияния и делением на нормирующую величину — сумму  $\gamma$ .

Далее, в соответствии с общепринятой методикой, рассчитывается значение численного расстояния  $x$  и соответствующее ему значение множителя ослабления на данной трассе. Весь математический аппарат представлен в статье [7].

Для расчета мощности сигнала в точке наблюдения используются значения мощности передатчика с учетом коэффициента усиления антенны, расстояние и полученное значение коэффициента ослабления.

#### Метод определения зон уверенного приема и нестабильной работы

Автоматизация расчета мощности электромагнитной волны конкретного ИРИ в заданной точке позволяет создать программу, рассчитывающую мощности электромагнитного поля во всех точках поверхности Земли (с шагом, равным шагу пикселей на карте, предназначенной для отображения результатов) для всех ИРИ, перечисленных в исходных данных. В этом случае имеется возможность, меняя критерии устойчивой и нестабильной работы РЭС, определить точки (области) на поверхности Земли, в которых прием сигнала будет гарантированным, нестабильным или отсутствовать полностью.

Алгоритм, реализованный в программе и представленный на рис. 4, выполняет следующие действия:

- загрузка данных о карте (масштабные коэффициенты и положение на карте начала географических координат) и растровых данных карты для отображения результатов расчета (Блок 1);
- загрузка данных о РЭС (Блок 2) и определение (пользователем) принадлежности каждой РЭС к одной из групп (Блок 3);
- определение оператора (сумма или максимум) <sup>1</sup>в каждой группе (Блоки 4 и 5);
- перебор всех пикселей карты, далее для каждого пикселя (Блок 6):
- определение соответствующих этим пикселям географических координат (Блок 7). В дан-

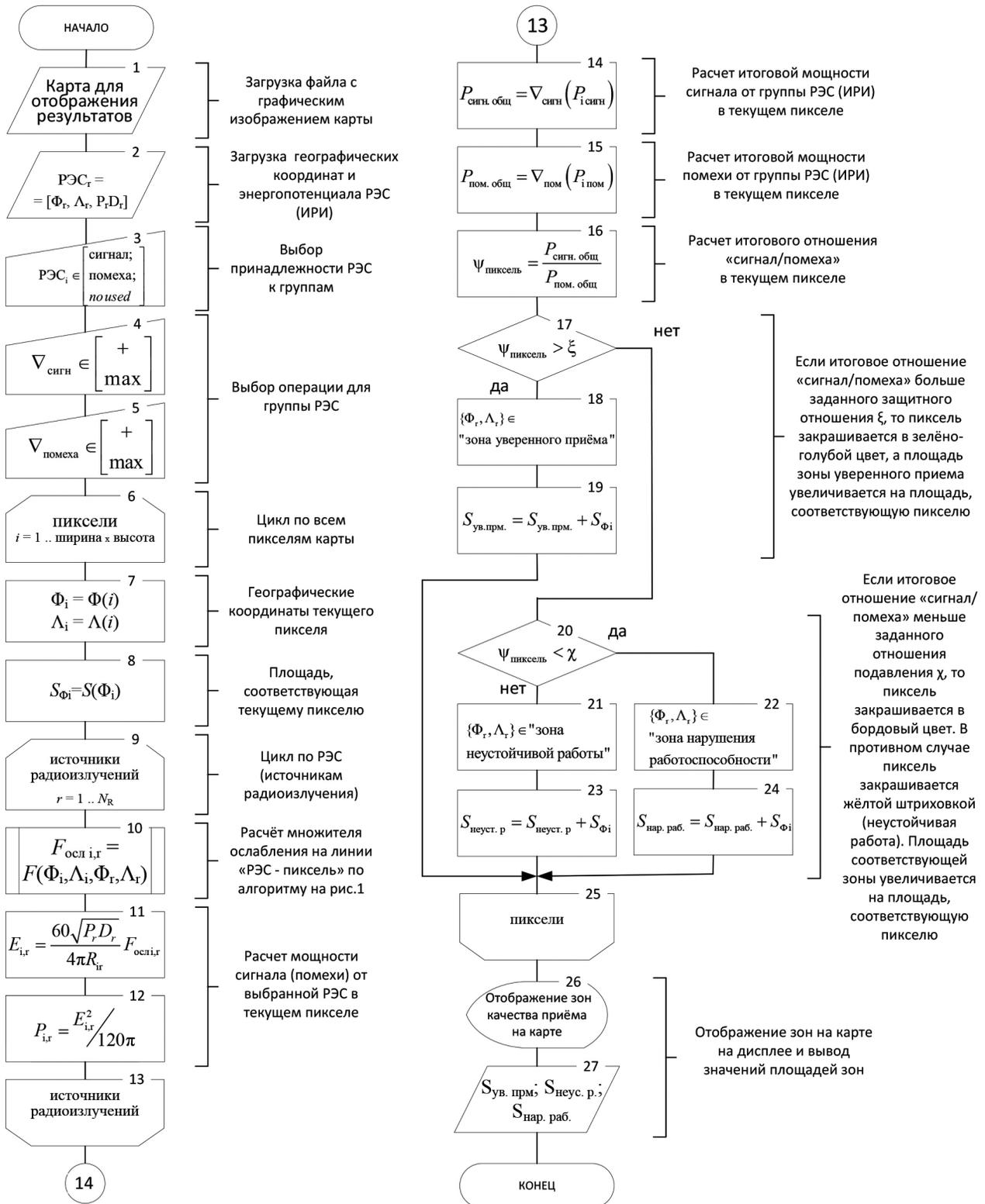


Рис. 4. Алгоритм программы для расчёта зон уверенного приёма и неустойчивой работы

ном алгоритме реализован алгоритм пересчета только для карт в проекции Меркатора;

- расчет площади поверхности, соответствующей одному пикселю (Блок 8), так как при отображении сферической поверхности на плоскости для разных участков карты применяются разные масштабы (например, ближе к полюсам меридианы сходятся и площадь одного квадратного градуса уменьшается);

- расчет значений коэффициента ослабления от каждого источника радиоизлучения до точки, соответствующей текущему пикселю (Блок 10) на основе алгоритма, приведенного на рис. 1;

- расчет значений напряженности электрического поля (Блок 11) и мощности (Блок 12) от каждого источника радиоизлучения в точках, соответствующих каждому пикселю;

- расчет мощности сигнала (Блок 14) и мощности помехи (в том числе шумов) (Блок 15) в соответствии с выбранным оператором;

- определение отношение сигнал/шум  $\psi$  (Блок 16);

- сравнение с заданными критериями неустойчивой работы и нарушения работоспособности ( $\xi$  и  $\chi$ ), отнесение данной точки к одной из трех категорий (Блоки 17 и 20);

- закраска пикселя в соответствующий цвет (Блоки 18, 21, 22);

- расчет площади поверхности Земли, соответствующей данному пикселю, и суммирование этих элементарных площадей (Блоки 19, 23, 24);

- отображение результатов: численные значения площадей (Блок 26) и зоны на карте (Блок 27).

Дополнительно к вышесказанному требуется пояснить следующий термин: «операция для группы РЭС» (Блоки 4, 5, 14 и 15). Этот оператор имеет смысл при наличии в группе (сигнал, помеха) более одной РЭС. Он определяет, как привести к одному значению мощности всех РЭС, входящих в группу.

Как было описано, критериев качества работы РЭС в данной программе используется два: защитное отношение  $\xi$  и отношение подавления  $\chi$ . Защитное отношение определяет граничное отношение мощности сигнала к суммарной мощности шумов и помех, при превышении которого гаран-

тируется заданное качество работы РЭС. Отношение подавления также определяет граничное отношение мощности сигнала к суммарной мощности шумов и помех. Но в этом случае снижение показателя ниже указанной границы означает полную невозможность работы РЭС.

Рассматриваемые зоны имеют следующие характеристики: геометрическую форму, географическое положение и площадь. Если последняя характеристика выражается одним числом, то для отображения двух других требуются операции в графике. Поэтому для выводов результатов расчетов используется карта земного шара. Расчет всех энергетических параметров осуществляется с шагом, равным шагу пикселей.

Площадь зоны уверенного приема в соответствии с моделью определяется:

$$S_{\text{ув.п.}} = \sum_{\varphi} N_{\text{ув.п.}\varphi} \cdot S_{\varphi},$$

где  $N_{\text{ув.п.}\varphi}$  — количество пикселей на карте на широте  $\varphi$  где выполняется условие  $P_c/P_n > \xi$ ;

$S_{\varphi}$  — площадь поверхности Земли, соответствующая пикселю на данной широте  $\varphi$ .

Аналогично находятся площади зон неустойчивой работы и нарушения работоспособности.

Для оценки степени покрытия земного шара зонами уверенного и неуверенного приема введем понятие коэффициента покрытия. Коэффициенты покрытия зонами определяются:

$$K_{\text{зоны}} = \frac{S_{\text{зоны}}}{S_{\text{Земли}}} \cdot 100\%.$$

### Пример расчета коэффициента покрытия зонами уверенного приема радиосигналов в радиолинии в СДВ и ДВ диапазонах

В таблице приведены результаты расчетов зон покрытия (в диапазоне ДВ) для ситуаций, когда при постоянном наборе мешающих РЭС источник полезного сигнала переносится ближе к морю и к источникам помех.

Здесь РЭС, создающие помеху, обозначены белыми треугольниками и расположены:

<sup>1</sup> В текущей версии программы реализованы только указанные операторы. В дальнейшем возможно расширение функционала.

Результаты моделирования зон при изменении расположения сигнальной РЭС

Вариант	Зона уверенного приема, млн км <sup>2</sup>	Зона неустойчивой работы, млн км <sup>2</sup>	Зона нарушения работоспособности, млн км <sup>2</sup>
$\varphi = 48, \lambda = 144$ о. Сахалин	54,0	227,1	229,3
$\varphi = 50, \lambda = 140$ Комсомольск-на-Амуре	22,6	164,5	323,2
$\varphi = 54, \lambda = 120$ Чита — Тында	13,6	165,8	331,0

$\varphi = 32,12; \lambda = 115,00$  (Китай);  $P = 350$  кВт;  
 $\varphi = -5,00; \lambda = 145,00$  (Новая Гвинея);  
 $P = 400$  кВт;  
 $\varphi = 62,00; \lambda = -140,00$  (Аляска);  $P = 500$  кВт;  
 $\varphi = 23,00; \lambda = -110,00$  (Калифорния);  
 $P = 400$  кВт.

Сигнальная РЭС (400 кВт), обозначенная белой окружностью с крестом, располагается:

Вариант 1 (рис 5 а):  $\varphi = 48, \lambda = 144$ ;

Вариант 2 (рис 5 б):  $\varphi = 50, \lambda = 140$ ;

Вариант 3 (рис 5 в):  $\varphi = 54, \lambda = 120$ .

Параметры приема:  $\xi = -3$ дБ,  $\chi = -8$ дБ. Все антенны ненаправленные, что характерно для СДВ и ДВ диапазонов.

Анализ приведенных значений площадей и изображений зон показывает, что для передающей РЭС, расположенной ближе к морю, зоны уверенного приема и неустойчивой работы существенно увеличиваются.

**Предложения по выбору мест географического расположения передающих и приемных РЭС и работающих в СДВ и ДВ диапазонах для формирования необходимых зон уверенного (устойчивого) приема потребителями (абонентами) специальной информации**

Предпосылками для разработки предложений по количеству передающих РЭС, работающих в СДВ и ДВ диапазонах, и их географическому расположению (размещению), необходимых для формирования требуемых зон уверенного приема потребителями (абонентами) специальной информации, являются:

– учет влияния на распространение радиосигнала подстилающей поверхности земного шара;

– воздействия различного вида помех на качество приема полезного сигнала;

– ограничения по мощности передатчика(ов) РЭС, связанные с его возможным географическим положением вблизи населенных пунктов, заповедников и пр., появлением излучений, оказывающим негативное воздействие на живые организмы и природу.

Для расширения или обеспечения требуемыми зонами уверенного приема кроме стационарных, возможно применение транспортабельных передающих РЭС с необходимыми ТТХ.

Для повышения устойчивой работы аппаратуры потребителей в СДВ и ДВ диапазонах в случае неблагоприятной помеховой обстановки необходимо:

– повысить уровень помехоустойчивости аппаратуры потребителей;

– разместить в требуемых местах транспортабельные станции передачи (ретрансляции) сигналов;

– в районах сильного подавления использовать сигналы, передаваемые в других диапазонах.

**Выводы**

Таким образом, в результате моделирования были получены зависимости размеров зон подавления и уверенного приема радиосигналов в СДВ и ДВ диапазонах от пространственного (географического) расположения передающих РЭС на различного типа подстилающей поверхности с учетом помеховой обстановки. Проведенный анализ исследуемых зависимостей показал, что за счет более рационального пространственного (географического) размещения передающих РЭС,

с учетом воздействий помех различного типа, можно сформировать необходимые зоны для уверенного приема специальных сигналов аппаратурой потребителей. Даны предложения по размещению передающих РЭС на различных типах подстилающей поверхности земли и их количества, ТТХ для обеспечения устойчивой связью, а также по возможности расширять сформированные необходимые зоны уверенного приема с применением мобильных передающих РЭС.

### Литература

1. Гончарова Ю.Н. Особенности моделирования распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона в волноводе земля-ионосфера // *Transport and Telecommunication*. 2005. Том. 6. № 3. С. 343–444.

2. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. — М.: Наука, 1991. 196 с.

3. Вознюк В.В., Куценко Е.В., Ворона С.Г. Исследование потенциальной помехоустойчивости оптимального приемника сигналов на фоне белого гауссовского шума в условиях воздействия множества непреднамеренных узкополосных помех // *Нелинейный мир*. 2020. Т. 18. № 3. С. 29–43.

4. Вознюк В.В., Куценко Е.В., Ворона С.Г. Исследование потенциальной помехоустойчивости оптимального приемника с возможностью адаптации к виду и параметрам помех в условиях воздействия множества узкополосных шумовых помех // *Нелинейный мир*. 2020. Т. 18. № 4. С. 41–57.

5. Паршуткин А.В., Копалов Ю.Н. Исследование потенциальных проблем обеспечения электромагнитной совместимости перспективных низкоорбитальных многоспутниковых систем связи и передачи данных с земными станциями фиксированной спутниковой службы // *Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Радиоэлектронная борьба в современном мире»*. 2021. С. 183–185.

6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. — М.: Госэнергоиздат. 1961. 480 с.

7. Сафаралеев В.А., Наговицын А.В., Наговицына А.Н. Методика расчета ослабления радиоволн сверхдлинноволновых и длинноволновых диапазонов с учетом параметров подстилающей поверхности // *Вопросы оборонной техники. Се-*

*рия* 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 7–8 (157–158). С. 70–81.

8. Рекомендации МСЭ-R P.832-4. Мировой атлас проводимости почвы. Серия Р. Распространение радиоволн (07/201). 53 с.

### References

1. Goncharova Yu.N. Osobennosti modelirovaniya rasprostraneniya radiovoln SDV-DV diapazona v volnovode zemlya ionosfera // *Transport and Telecommunication*. 2005. Vol. 6. № 3. Pp. 343–444.

2. Makarov G.I., Novikov V.V., Rybachek S.T. Rasprostranenie elektromagnitnyh voln nad zemnoj poverhnost'yu. — М.: Nauka, 1991. 196 p.

3. Voznyuk V.V., Kucenko E.V., Vorona S.G. Issledovanie potencial'noj pomekhoustojchivosti optimal'nogo priemnika signalov na fone belogo gaussovskogo shuma v usloviyah vozdejstviya mnozhestva neprednamerennyh uzkopolosnyh pomekh // *Nelinejnyj mir*. 2020. T. 18. № 3. Pp. 29–43.

4. Voznyuk V.V., Kucenko E.V., Vorona S.G. Issledovanie potencial'noj pomekhoustojchivosti optimal'nogo priemnika s vozmozhnost'yu adaptacii k vidu i parametram pomekh v usloviyah vozdejstviya mnozhestva uzkopolosnyh shumovyh pomekh // *Nelinejnyj mir*. 2020. T. 18. № 4. Pp. 41–57.

5. Parshutkin A.V., Kopalov Yu.N. Issledovanie potencial'nyh problem obespecheniya elektromagnitnoj sovместимости perspektivnyh nizkoorbital'nyh mnogosputnikovyh sistem svyazi i peredachi dannyh s zemnymi stanciyami fiksirovannoj sputnikovoj sluzhby // *Sbornik докладов II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Radioelektronnaya bor'ba v sovremennom mire»*. 2021. Pp. 183–185.

6. Chernyj F.B. Rasprostranenie radiovoln. — М.: Gosenergoizdat. 1961. 480 p.

7. Safaraleev V.A., Nagovicyn A.V., Nagovicyna A.N. Metodika raschyota oslableniya radiovoln sverhdlinnovolnovykh i dlinnovolnovykh diapazonov s uchyotom parametrov podstilayushchej poverhnosti // *Voprosy obronnoj tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu*. 2021. № 7–8 (157–158). Pp. 70–81.

8. Recommendations MSE-R P.832-4. World atlas of soil conductivity. Series R. Propagation of radio waves (07/201). 53 p.