

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ
Федеральное государственное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиопизический институт»
(ФГНУ «НИРФИ»)

ИСКУССТВЕННЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ИСТОЧНИК
НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ЗАДАЧАХ ЗОНДИРОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Поляков Сергей Владимирович

Препринт № 516

ИСКУССТВЕННЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ИСТОЧНИК
НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ЗАДАЧАХ ЗОНДИРОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Поляков С.В.

Подписано в печать 02.10.2007 г. Формат 60 × 84/16
Бумага писчая. Объем 1 усл. п. л. Заказ 5572. Тираж 50.

Отпечатано в ФГНУ «НИРФИ».
603950 Н.Новгород, ул. Б.Печерская, 25

Нижний Новгород
2007

ИСКУССТВЕННЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ИСТОЧНИК НИЗКОЧАС-
ТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ЗОНДИ-
РОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Поляков С.В. //

Препринт №516. – Нижний Новгород: ФГНУ «НИРФИ», 2007. –
20с.

УДК 550.388.2

В работе сделаны теоретические оценки сравнительной эффективности традиционных методов зондирования ряда процессов и объектов окружающей среды и предложенных в литературе новых методов, основанных на использовании эффекта генерации низкочастотных полей при модуляции естественных ионосферных токовых систем мощным радиоизлучением наземных передатчиков. Рассмотрена диагностика внутренних гравитационных волн, электромагнитное зондирование земли, диагностика ионосферного альвеновского резонатора, локация магнитосферы. Приведена оценка имеющегося опыта. Показано, что за исключением локации магнитосферы все рассмотренные методы по сложности, информативности и эффективности проигрывают традиционным методам. При благоприятных геофизических и географических условиях ионосферный источник УНЧ и ОНЧ электромагнитных полей может обеспечивать наиболее эффективную инжекцию волн в магнитосферу.

© Научно-исследовательский радиофизический институт, 2007

18. Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т.32, №6. С. 663
19. Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т.32, №7. С. 802
20. Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Поляков С.В. Исследование особенностей резонансной структуры спектра УНЧ фонового шума с учетом наклона магнитного поля Земли. // Изв. вузов. Радиофизика (в печати).
21. Bosinger N., Paschin T., Kero A., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62, No. 4. P. 277.

3. Willis J.W., Davis J.R. // J. Geophys. Res. 1973. V.78, No. 25. P.5710
4. Котик Д.С., Трахтенгерц В.Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т.21, № 2. С. 114.
5. Митяков Н. А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. В кн. Итоги науки и техники. Сер. Геомagnetизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНТИ, 1989. Т.9. С. 140.
6. Жданов М.С. Электроразведка. Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316с.
7. Бабиченко А.М. и др. // ДАН СССР. 1984. Т.276, №4. С. 840.
8. А.с. № 987552 СССР. Способ геоэлектрической разведки. / Котик Д.С., Поляков С.В., Рапопорт В.О. Зарегистрировано 07.09.82; Приоритет от 24.07.81
9. Пат. US 5777476. USA. Ground global tomography (CGT) using modulation of the ionospheric electrojets / Papadopoulos K. Заявл. 08.12.95; Оpubл. 07.07.98.
10. Котик Д.С., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Тамойкин В.В. К теории сигналов комбинационных частот. В кн. Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. Апатиты, 1979. С. 114.
11. Поляков С.В. Резников Б.И., Шлюгаев Ю.В., Копытенко Е.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С. 1030.
12. Rowe H.E. // IEEE Trans. Comm. 1974. V. 22, No. 4. P. 371.
13. Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 151.
14. Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Собчаков Л.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. Т.48. № 9. С. 788.
15. Ermakova E.N., Kotik D.C., Polyakov S.V., et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, P. A04305
16. Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. // ДАН СССР. 1987. Т. 297, №4. С. 840.
17. Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Yu. // J. Atmos. Terr. Phys. 1990. V.52, No. 9. P. 781.

Введение

В статье рассматриваются возможности, и оценивается имеющийся опыт зондирования окружающей среды с использованием контролируемого источника низкочастотных полей, возникающего в нижней ионосфере при воздействии мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением. Впервые низкочастотное излучение на частоте модуляции мощного радиоизлучения (сигналы комбинационных частот СКЧ) было зарегистрировано в Горьком в 1973 г. в диапазонах очень низких и ультранизких частот (ОНЧ – 3÷30 кГц; УНЧ – 300 Гц÷3 кГц) [1]. В дальнейшем (1985 г.) с использованием стенда «Сура» была достигнута уверенная регистрация СКЧ в диапазоне крайне низких частот (КНЧ – 3÷30 Гц). Подробное изложение результатов исследований СКЧ на стенде «Сура», включая первые опыты по диагностике ионосферы, содержится в обзоре [2]. Механизм генерации СКЧ, основанный на модуляции естественных ионосферных токовых систем, в настоящее время детально разработан [2] и общепризнан. С точки зрения приоритета отметим, что впервые механизм модуляции электронной концентрации и, соответственно, ионосферных токов в качестве источника низкочастотных электромагнитных полей был предложен в работе [3], в которой эффект периодического нагрева нижней ионосферы рассматривался как причина модуляции электронной концентрации за счет температурной зависимости скоростей фотохимических реакций («концентрационный» источник). Чуть позднее, в работах [1, 4] в качестве причины СКЧ были предложены искусственные вариации проводимости среды и, соответственно, ионосферных

токов за счет температурной зависимости электронной частоты столкновений («температурный» источник). В диапазоне КНЧ и на более высоких частотах «температурный» источник играет доминирующую роль. В конечном итоге «движущей силой» ионосферных токов и, соответственно, источников СКЧ являются нейтральные ветры (средние широты) и электрические поля магнитосферной конвекции (полярные широты). В России эффект генерации СКЧ получил название «Эффект Гетманцева». С точки зрения зондирования окружающей среды эффект Гетманцева представляет две принципиальные возможности. Во-первых, спектры и поляризация сигналов на комбинационных частотах зависят от высотных профилей электронной концентрации, частот соударений, нейтрального ветра и квазистационарного электрического поля в области генерации. Однако зависимость СКЧ от названных параметров нижней ионосферы очень сложна, и предложить какую-либо систему диагностики с решением обратной задачи по восстановлению профилей параметров нижней ионосферы в настоящее время не представляется возможным. Наиболее доступная информация содержится в динамических характеристиках СКЧ, отражающих прохождение внутренних гравитационных волн (ВГВ) в верхней атмосфере. Это направление исследований в свое время получило значительное развитие под названием «Исследование тонкой структуры ионосферных токов». Ионосферный источник может представлять интерес в задачах зондирования и безотносительно к механизму генерации. Он может быть использован для исследования крупномасштабных (порядка скин-слоя в среде) неоднородных структур в ионосфере и Земле. В силу значительного несоответствия вакуумной длины волны электромагнитных полей,

встречается редко и близко к экстремальному. Средняя (типичная) проводимость земли $\sigma = (10^{-3} \div 10^{-2})$ сим/м. При работе в географических районах с типичной проводимостью земли сравнительная эффективность ионосферного источника в задачах локации магнитосферы также будет возрастать.

Заключение

Основной вывод данной работы состоит в том, что за исключением задачи локации магнитосферы все рассмотренные в данной работе методы зондирования окружающей среды с использованием ионосферного источника неконкурентоспособны по сравнению с другими, более эффективными методами. В задаче локации магнитосферы в диапазоне КНЧ предпочтительнее наземный источник, который обеспечивает более интенсивные сигналы при сравнимых затратах мощности. В диапазонах УНЧ и ОНЧ ионосферный и наземный методы конкурируют, а при благоприятных географических и геофизических условиях ионосферный источник может обеспечивать наиболее эффективную инжекцию волн в магнитосферу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №07-02-01189-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гетманцев Г.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т.20, № 4. С. 229.
2. Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т.30, № 2. С. 248.

$$S_g \approx 0,46 h^2 \quad (2.18)$$

Введем эквивалентный токовый момент наземного источника по формуле:

$$H = (I \cdot l)_{\text{эке}} / S_g = I_{\text{нов}} \quad (2.19)$$

Здесь H определяется формулой (2.17), а S_g дает формула (2.18). Связь между магнитным полем H и поверхностным током $I_{\text{нов}}$ вида (2.19) обеспечивается тем, что полупространство атмосфера-земля имеет большой (формально бесконечный) импеданс. Окончательно для эквивалентного токового момента наземного источника можно записать:

$$(I \cdot l)_{\text{эке}} = 0,15 M_g / h = 0,15 \cdot (2PL / \sigma)^{1/2} / (\pi f \mu_0 h) \quad (2.20)$$

В формуле (2.20) использованы выражения для параметров $M_g = I L \delta_g$, приведенные выше. Полагая $L = 100$ км, $h = 70$ км, $P = 100$ кВт, $\sigma = 10^{-4}$ сим/м, получаем оценку эквивалентного токового момента наземного источника:

$$(I \cdot l)_{\text{эке}} = 7,6 \cdot 10^6 \cdot f^{-1} \text{ [А} \cdot \text{м]} \quad (2.21)$$

Для $P = 100$ кВт и скорости дрейфа в ионосфере $V = 30$ м/с токовый момент ионосферного источника имеет величину

$$(I \cdot l)_i = 8 \cdot 10^3 \text{ [А} \cdot \text{м]} \quad (2.22)$$

Таким образом, на частотах $f < 950$ Гц эквивалентный токовый момент наземного источника превышает токовый момент ионосферного источника. Везде в работе оценка величины токового момента ионосферного источника сделана для спокойных геофизических условий. В период геомагнитных возмущений $(I \cdot l)_i$ может возрасти примерно на порядок. Необходимо также отметить, что эффективность наземного источника зависит от проводимости земли в месте расположения источника. Для высокой эффективности требуется очень низкая проводимость, причем принятое для оценок значение $\sigma = 10^{-4}$ сим/м

необходимых для зондирования, и разумных размеров источника создание эффективных источников представляет собой сложную техническую задачу. По этой причине любая новая возможность создания источника низкочастотных электромагнитных полей привлекает внимание геофизиков.

Целесообразность и эффективность использования эффекта Гетманцева в задачах зондирования окружающей среды можно определить путем сравнения с другими источниками (например, по коэффициенту полезного действия) или с другими методами (по объему и качеству получаемой информации), что и составляет предмет данной работы. Рассмотрим последовательно возможные объекты зондирования.

1. Исследование тонкой структуры ионосферных токов

Пространственно-временная структура источников СКЧ отражает динамику и структуру нейтрального ветра на высотах $h \approx (70 \div 80)$ км. Диагностические возможности заложены в механизме генерации СКЧ. Средние характеристики интенсивности и эллипса поляризации СКЧ отражают направление и скорость крупномасштабной атмосферной циркуляции в области нагрева. Динамические характеристики СКЧ содержат информацию о пространственно-временных вариациях скорости нейтральной компоненты. Временное разрешение здесь определяется временем накопления полезного сигнала и может быть достаточно хорошим – порядка секунды, пространственное разрешение составляет километры по высоте (минимальный размер скин-слоя) и первые десятки километров по горизонтали (размер области засветки ионосферы диаграммой направленности наземного пе-

редатчика). Всего на стенде «Сура» было проведено более десятка суточных или полусуточных сеансов с непрерывной регистрацией параметров СКЧ [5]. Во всех экспериментах зафиксирована соответствующая теоретической модели зависимость магнитного поля СКЧ от силы и направления крупномасштабного ионосферного тока, соответствующего т.н. солнечно-суточной вариации. Какой-либо четкой взаимосвязи параметров низкочастотного излучения и индекса планетарной геомагнитной активности не обнаружено. Практически во всех суточных сеансах, проведенных на стенде «Сура», наблюдалась модуляция параметров низкочастотного излучения, вероятнее всего, связанная с прохождением ВГВ. При этом периоды флуктуаций составляли от 0,5 до 3 часов, а относительные значения флуктуаций амплитуды магнитного поля СКЧ достигали 100%. Для детального исследования параметров ВГВ, включая направление распространения, необходимы одновременные измерения движений среды в горизонтально и вертикально разнесенных точках. Горизонтальный разнос можно осуществить при работе двумя передатчиками на две независимые антенные системы с различными диаграммами направленности. Стенд «Сура» позволяет работать в подобном режиме, поскольку состоит из трех передатчиков, нагруженных на три независимые секции антенны. Причем каждая секция может иметь наклон к северу или югу на 40°. Вертикальный разнос можно осуществить, используя зависимость эффективной высоты источников СКЧ от частоты модуляции. Указанные алгоритмы определения вектора скорости движения атмосферы лежат в основе метода диагностики ВГВ с использованием стенда «Сура». Основные экспериментальные исследования в обсуждаемом направлении были прове-

римы с гирочастотами электронов на вершинах соответствующих силовых линий земного магнитного поля. В диапазонах СНЧ и КНЧ систем локации магнитосферы в настоящее время не существует. Эти диапазоны особенно интересны тем, что в них попадают гирочастоты ионосферных и магнитосферных ионов.

Сделаем сравнительную оценку эффективности излучения низкочастотных волн в магнитосферу ионосферным источником и наземным источником типа заземленной на концах ЛЭП. Сразу можно сказать, что эффективность ионосферного источника при излучении вверх многократно превышает его эффективность при излучении в полость земля-ионосфера. Это связано с тем, что на рассматриваемых частотах импеданс полупространства ионосфера-земля много больше входного импеданса ионосферы. Для сравнительной оценки введем понятие эквивалентного токового момента наземного источника $(I \cdot l)_{\text{экв}}$. Полагаем, что эквивалентный токовый момент расположен на нижней кромке ионосферы и по интенсивности излучения в магнитосферу эквивалентен наземному источнику. Квазистатическое магнитное поле на расстоянии h от магнитного диполя в направлении поперек от диполя дает формула:

$$H = M / (4\pi\mu_0 h^3) \quad (2.16)$$

Запишем $M = \mu_0 M_g = \mu_0 I L \delta_g$ и учтем, что источник (наземная ЛЭП) и приемная точка (нижний край ионосферы над наземным источником) расположены вблизи полупространств с малым импедансом. Тогда магнитное поле на нижней границе ионосферы над наземным источником можно записать в виде:

$$H = M_g / (\pi h^3) \quad (2.17)$$

Можно показать, что площадь «засветки» ионосферы наземным источником по уровню 0,7 дает приближенная формула:

носферного источника для формирования зондирующего сигнала [2, 21]. В одном опыте [2] использовался стенд «Сура», в другом — стенд EISCAT [21]. Обнаружены особенности спектра, подобные РСС. Однако сигналы комбинационных частот (СКЧ) в диапазоне КНЧ очень слабы и для уверенной регистрации непрерывного гармонического сигнала в среднеширотных условиях требуется время накопления 10÷15 мин (время измерения одной точки спектра). Такое же время усреднения требуется для получения очень качественной картинки усредненного полного спектра грозового шума в диапазоне КНЧ, содержащее РСС. Таким образом, естественный шумовой фон позволяет получать гораздо более оперативную и качественную информацию по диагностике ИАР по сравнению с ионосферным источником.

4. Инжекция волн в магнитосферу

Для исследования удаленных объектов в магнитосфере (дакты, другие неоднородные структуры, радиационные пояса), не имеющих таких регулярных свойств как ИАР, методы усреднения естественного шума, описанные в предыдущем разделе, не пригодны. Для зондирования (локации) магнитосферы в верхней части диапазона ОНЧ уже полвека успешно используются связные СДВ-радиостанции. Для локации магнитосферы в нижней части диапазона ОНЧ и в диапазоне УНЧ Стэнфордским университетом США в Антарктиде была построена специальная радиостанция Siple. Возможность эффективного взаимодействия излучения названных радиосредств с энергичными частицами радиационных поясов определяется тем обстоятельством, что рабочие частоты СДВ-радиостанций и Siple соизме-

нены более 20 лет назад. Получены значения фазовых скоростей, характерные для ВГВ. В мировой практике для измерения ветра в мезосфере используются так называемые MST-радары.

2. Электромагнитное зондирование земли

Электромагнитные зондирования с контролируруемыми (искусственными) источниками являются одними из ведущих электроразведочных методов [6]. Наиболее широкое распространение получили два способа возбуждения переменного электромагнитного поля в Земле. Первый способ основан на пропускании переменного электрического тока через электроды, погруженные в Землю. Он называется гальваническим способом возбуждения поля. При втором способе на поверхности Земли укладывают электрический провод в виде петли достаточно большого размера (индукционный способ). В практике электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками измерения поля производят либо непосредственно внутри генераторной петли (зондирование становлением поля в ближней зоне), либо на расстоянии, не менее чем в 3÷5 раз превышающее глубину зондирования (частотное электромагнитное зондирование) [6]. На подобных достаточно больших удалениях контролируемый источник при гальваническом способе возбуждения поля эквивалентен магнитному диполю с моментом

$$M = Il\delta. \quad (2.1)$$

Здесь (Il) — токовый момент источника, I , l — ток и расстояние между электродами, соответственно, δ — глубина скин-слоя в земле. Отметим, что в системе СИ магнитный момент определяется как $M_{СИ} = \mu_0 IS$, т. е. формула (2.1) является внесистемным определением. При индукционном способе возбуждения эквива-

лентным источником является магнитный квадруполь. Здесь ситуация аналогична ионосферному источнику, для которого распределенный ионосферный ток с точки зрения наземного наблюдателя может быть заменен эквивалентным источником, расположенным на нижней кромке ионосферы. В случае $h \gg \delta_i$ (h — высота полости Земля-ионосфера, δ_i — скин-слой в ионосфере) эквивалентным источником также является магнитный диполь с моментом (2.1), где параметры имеют ионосферные значения [2]. Из сказанного следует, что для оценки эффективности ионосферного источника в задачах электромагнитного зондирования Земли логично сравнить магнитные моменты ионосферного источника и наземного источника при гальваническом способе возбуждения для разумных значений параметров установок и при сравнимых затратах мощности. Сразу отметим существенный «минус» ионосферного источника, связанный с большим минимально возможным удалением $r \geq h \geq 70$ км от объекта зондирования (земля). Обсуждение возможности использования ионосферного источника для зондирования Земли содержится в публикациях [7 – 9].

Для оптимальных условий полный токовый момент ионосферного источника низкочастотных полей дает универсальная формула [2]

$$(I)_i = \frac{2eVP}{3kT\delta\omega_H} \quad (2.2)$$

Здесь P — мощность нагревного передатчика, e — заряд электрона, δ — доля энергии, передаваемая электроном при столкновении с нейтральной частицей, k — постоянная Больцмана, T — температура, ω_H — гирочастота электронов в ионосфере, V — скорость нейтрального ветра или скорость электродинамическо-

источника: $L \approx 1$ км, $\sigma_g \approx 10^{-2}$ [1/(Ом·м)] (типичная проводимость земли). Даже в этом случае остается преимущество наземного источника из-за возможности работы на относительно малых удалениях от источника $\rho \ll h$. Если учесть, что технически наземный источник несоизмеримо проще (и дешевле) установки для нагрева ионосферы, то мы вынуждены констатировать неконкурентоспособность ионосферного источника по сравнению с наземным в задачах электромагнитного зондирования земли. В принципе возможно использование имеющихся стендов для зондирования земли как попутной задачи.

3. Ионосферные альвеновские резонансы

Еще один объект, для исследования которого использовался ионосферный источник – ионосферный альвеновский резонатор (ИАР). Впервые ИАР был обнаружен в результате исследований тонкой структуры усредненных спектров горизонтального магнитного поля естественного грозового шумового фона в диапазоне частот $f \approx (1 \div 10)$ Гц. А именно, была обнаружена регулярно наблюдаемая так называемая резонансная структура спектра (РСС), которая проявляется в виде чередования максимумов и минимумов шума с частотным интервалом в несколько герц и глубиной модуляции в десятки процентов [16, 17]. Далее было показано [18], что РСС является проявлением ИАР, а точнее говоря следствием существования области нарушения геометрической оптики для волн в диапазоне КНЧ на переходе ионосфера-магнитосфера. Показательные примеры РСС приведены в работах [19, 20]. К настоящему времени известно два успешных опыта по диагностике ИАР с использованием ио-

Здесь R — сопротивление нагрузки, которое складывается из сопротивления проводов, сопротивления заземления и сопротивления земли. Если сопротивления проводов и заземления достаточно малы, сопротивление нагрузки дает формула [12]

$$R = \frac{\pi f \mu_0 L}{4} \quad (2.13)$$

Формула (2.13) получена в предположении, что $L \gg \delta_g$, где δ_g — глубина скин-слоя в земле

$$\delta_g = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (2.14)$$

Вообще говоря, здесь нагрузка, кроме активного, имеет также реактивный (индуктивный) импеданс. Мы полагаем, что реактивный импеданс соответствующим образом скомпенсирован. Теперь мы можем записать магнитный момент наземного источника

$$M_g = IL\delta_g = \frac{2}{\pi \mu_0 f} \sqrt{\frac{2PL}{\sigma_g}} \approx \frac{7,2 \cdot 10^{12}}{f} [\text{А} \cdot \text{м}^2] \quad (2.15)$$

В формуле (2.15) при оценке полагалось $L = 100$ км, $P = 100$ кВт, $\sigma_g = 10^{-4} [1/(\text{Ом} \cdot \text{м})]$. Результаты экспериментов по генерации крайне низкочастотных электромагнитных полей с использованием расположенной на Кольском полуострове ЛЭП длиной около ста километров приведены в работах [13 – 15]. Из формул (10) и (14) следует, что для $f = 1$ кГц, $M_g \approx 7 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^2$; $M_i \approx 4 \cdot 10^7 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, т. е. наземный магнитный диполь более чем на два порядка превышает ионосферный источник. При понижении частоты отношение M_i/M_g уменьшается как \sqrt{f} . Для частоты $f \approx 1$ кГц наземный и ионосферный источники соизмеримы для не экстремальных и довольно скромных параметров наземного

го дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях, (Il) — интеграл от плотности тока по объему, занятому источниками.

Под оптимальными понимаются условия, при которых подавляющая часть мощности нагревного передатчика поглощается на нижней кромке ионосферы в области с вертикальным масштабом, не превышающем скин-слой. В принципе это условие может быть реализовано в любых возможных условиях путем выбора несущей частоты установки для воздействия на ионосферу вблизи гирочастоты электронов в ионосфере с зенитным излучением волн циркулярной поляризации, соответствующей так называемой необыкновенной волне. В произвольном (не оптимальном) случае формула (2.2) дает для ионосферного токового момента оценку сверху. Для корректной оценки в формуле (2.2) следует сделать замену $P \rightarrow P_i$, где P_i — часть мощности, поглощаемая на нижней кромке ионосферы с вертикальным размером порядка скин-слоя. Необходимо отметить, что употребляемое здесь и ранее [2] понятие скин-слоя в ионосфере имеет условный характер, поскольку полной аналогии между Землей и ионосферой нет. Во-первых, электродинамические параметры ионосферной плазмы существенно (качественно) отличаются от свойств земли. Во-вторых, переход атмосфера-ионосфера не имеет резкой границы. Формально строгое определение токового магнитного момента ионосферного источника можно ввести, пользуясь понятием импеданса ионосферы Z_i .

$$(I_M l) = (Il)_i Z_i \quad (2.3)$$

Здесь I_M — фиктивный магнитный ток. В [10, 11] выражение (2.3) называется магнитным моментом, что не совсем точно. Формула

(2.3) определяет токовый магнитный момент, который связан с системным определением магнитного момента очевидным соотношением

$$(I_M) = \omega M_{СИ} = \omega \mu_0 I S \quad (2.4)$$

Данная статья претендует только на получение оценок, поэтому во всем тексте под различными величинами понимаются их абсолютные значения.

Формула (2.3) не так наглядна, как (2.1), но позволяет рассчитать токовый магнитный момент для любой модели ионосферы. Приведем характерные значения Z_i для ночной и дневной моделей ионосферы [10, 11]. В ночных условиях можно использовать модель ионосферы с резкой границей. В этом случае

$$Z_i = Z_0/n_i \quad (2.5)$$

Здесь $Z_0 = 120\pi$ Ом — импеданс вакуума, n_i — показатель преломления в Е-слое ионосферы. Величину n_i можно оценить по формуле

$$n_i = 10^2 \sqrt{10/f(\Gamma\mu)} \quad (2.6)$$

Для дневных условий наибольшей простотой и адекватностью обладает экспоненциальная модель ионосферы

$$n_i = \begin{cases} \exp[(z-h)/L], & z > h; \\ 1, & 0 < z < h. \end{cases} \quad (2.7)$$

Здесь h — высота ионосферы.

Для экспоненциальной модели (2.7)

$$Z_i = k_0 L Z_0 \left(\ln \frac{\gamma k_0 L}{2} \right) \quad (2.8)$$

Здесь $k_0 = \omega/c$ — волновое число вакуума, $\gamma \approx 1,78$ — постоянная Эйлера, $L \approx (5 \div 10)$ км.

Выше везде предполагается, что на ионосфере выполняются импедансные граничные условия ($n_i k_0 h \gg 1$, $k_0 L \ll 1$). Используя (2.1), (2.3) – (2.8) несложно показать, что для «ночной» модели ионосферы с резкой границей под эффективным скин-слоем δ_i в ионосфере следует понимать так называемую «перечеркнутую» ионосферную длину волны.

$$\delta_i = \frac{\lambda_i}{2\pi} = (n_i k_0)^{-1} \quad (2.9)$$

Для экспоненциальной «дневной» модели ионосферы $\delta_i \sim L$. Также можно показать, что для типичных значений параметров ионосферы ночные значения δ_i превышают дневные. Таким образом, для оценки максимального эффекта следует использовать ночную модель ионосферы. Подставляя в (2.2), (2.6), (2.9) значения констант и параметров, запишем

$$(II)_i[\text{А}\cdot\text{м}] = 2,7 P[\text{кВт}] V[\text{м/с}]; \quad \delta[\text{м}] = \frac{1,5 \cdot 10^5}{\sqrt{f[\Gamma\mu]}} \quad (2.10)$$

Полагая $P = 100$ кВт, $V = 30$ м/с, для магнитного момента (2.1) ионосферного источника получаем

$$M_i[\text{А}\cdot\text{м}^2] \approx \frac{1,2 \cdot 10^9}{\sqrt{f[\Gamma\mu]}} \quad (2.11)$$

Далее оценим магнитный момент наземного источника, который представляет собой генератор мощностью P , нагруженный на заземленную на концах линию электропередач (ЛЭП) длиной L . Проводимость земли σ_g . Ток в ЛЭП

$$I = \sqrt{\frac{2P}{R}} \quad (2.12)$$