

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ИОНОСФЕРЫ ДЕНЬ – НОЧЬ НА АМПЛИТУДУ СЧ РАДИОСИГНАЛА

А. П. Николаенко

*Институт радиопроизведения и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: sasha@ire.kharkov.ua*

Обработаны записи суточных изменений амплитуды сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоволны, зарегистрированные на антарктической станции «Беллингаузен», длина трассы распространения около 16 Мм. Средний уровень поля хорошо согласуется с литературными данными. В записях присутствуют суточные изменения амплитуды, вызванные неоднородностью ионосферы день – ночь. Дневной уровень поля ниже ночного на 5 – 6 дБ в вертикальной электрической компоненте и на 4 – 5 дБ в горизонтальной магнитной компоненте. Рассчитано поле в сферическом промежутке Земля – ионосфера для моделей полностью дневного и полностью ночного волноводов, взятых из литературы. Данные расчета противоречат наблюдениям, что, возможно, обусловлено неточностью задания модельной фазовой скорости радиоволн, от которой зависит положение интерференционных минимумов и максимумов поля. Расчет и измерения соответствуют друг другу, если откорректировать фазовую скорость волны на 10%. Поскольку однородные промежутки «полный день» или «полная ночь» не учитывают дифракции радиоволн на терминаторе, делается вывод о необходимости более точного моделирования и выполнении расчетов в неоднородном промежутке Земля – ионосфера.

Ил. 10. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: распространение радиоволн, неоднородный волновод, терминатор.

Радиоволны сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона охватывают частоты от 3 Гц до 3 кГц. Их применяют для зондирования нижней ионосферы за счет использования естественных резонансных колебаний сферической полости Земля – ионосфера, которая возбуждается грозовыми разрядами всей планеты. Резонансы называют шумановскими, если они наблюдаются на частотах ниже 50 Гц, и поперечными, если исследуются спектральные пики около частоты 1,6 кГц и ее гармониках, попадающих в диапазон сверхдлинных волн (СДВ). Естественный радиосигнал представляет собой случайную последовательность импульсов, пришедших от отдельных молний. Очевидно, что свойства ионосферы в таком сигнале проявляются косвенно, ее изучение предполагает сложную обработку, не всегда приводящую к успеху. Значительные трудности связаны при этом со случайным и неизвестным распределением молний в пространстве и во времени.

Более надежную информацию об ионосфере можно получить с помощью искусственных источников радиоизлучения, однако они обычно работают на частотах выше глобального резонанса [1–5]. Преимущество искусственных источников заключается в контролируемом излучении и в известном положении излучателя, но при этом трасса распространения фиксирована. Изменения сигнала легко соотнести со свойствами ионосферы на конкретной трассе в заданный момент времени. Недостаток измерений с применением искусственного источника состоит в том, что перенос трассы сопряжен с техническими трудностями, а также в одной, чаще всего единственной, частоте излучения.

В настоящей работе мы опишем экспериментальные результаты, в которых отчетливо наблюдались изменения амплитуды искусственного СНЧ радиосигнала, вызванные влиянием неоднородности день – ночь, и обсудим эти данные.

1. Постановка эксперимента. Источником радиоизлучения служил так называемый кольский источник (КИ), (см. рис. 1), координаты и параметры которого известны [4–6]. Излучение КИ уверенно регистрируется на всей планете, о чем свидетельствует спектр (рис. 2), адаптированный из работы [4]. Здесь показан средний спектр амплитуды поля, наблюдавшийся в Зондерстрём-фиорде (Гренландия) в течение января 1990 г. Кроме глобального резонанса на частотах 8, 14, 20 Гц и т. д. и хорошо известных гармоник линий электропередачи на 50 и 60 Гц уверенно принимается радиосигнал от КИ на частоте 82 Гц, сравнимый по амплитуде с основной гармоникой местной сети 60 Гц.

Не вдаваясь в подробности, которые читатель найдет в работе [4], отметим высокий уровень сигнала, равный –142,5 дБ на удалении в 16,5 Мм (1 Мм = 1000 км) (Данедин, Новая Зеландия) и –151,9 дБ на расстоянии 18,3 Мм (Эррайвэл Хайтс, Антарктида). Измерялось горизонтальное магнитное поле H_{ϕ} , перпендикулярное направлению на источник (см. табл. 1 в [4]).

Мы представляем результаты регистрации искусственного сигнала, выполненные годом ранее (февраль 1989 г.), на советской антарктической станции «Беллингаузен» (62,2° ю. ш. и 59° з. д.) Хорошо известно [1–7], что излучающая антенна, расположение которой показано на рис. 1, создает вертикальный виток тока за счет замыкания в земле. Это эквивалентно горизон-

тальному магнитному диполю. Максимум диаграммы близок к направлению горизонтального провода антенны (в нашем случае к линии запад – восток). С приемлемой точностью [6] можно считать, что источником поля служит вертикальный виток тока, его плоскость ориентирована вдоль параллели, а центр находится в точке $68,8^\circ$ с. ш. и $34,5^\circ$ в. д.

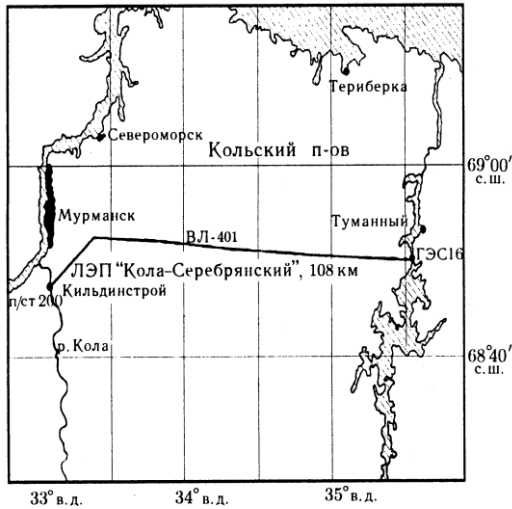


Рис. 1. Расположение горизонтального провода антенны КИ (ВЛ-401) длиной 108 км. Провод ЛЭП заземлен на концах через здания ГЭС – 16 и подстанцию 200 [6]

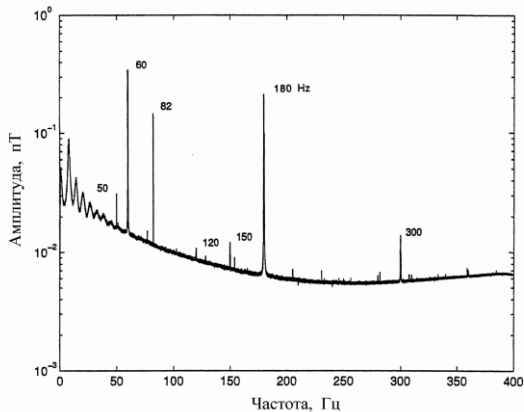


Рис. 2. Средний амплитудный спектр шумов нижней части СНЧ диапазона, наблюдавшийся в Зондерстрём фиорде, Гренландия, в январе 1990 г. Спектр вычислен по 1185 обзорным (синоптическим) записям (каждая длительностью 1 мин.), выполнявшимся дважды в час, если присутствовало излучение на частоте 82 Гц. Максимально возможное число таких записей для января равно 1488 из [4]

Станция «Беллинсгаузен» расположена на острове Ватерлоо ($62,2^\circ$ ю. ш. и 59° з. д.) и удалена от передающей антенны на расстояние 16,25 Мм. Заметим, что все полярные станции Антарктического полуострова имеют хорошие шансы принять СНЧ сигнал от КИ. Измерения велись попеременно на одну из двух антенн: вертикальную электрическую (ЭА) или горизонталь-

ную магнитную (МА). Их конструкции были типичными, (см. [2, 7]). Вертикальная ЭА – это емкостной датчик (собственная емкость активного электрода составляла около 50 пФ), поднятый на металлической мачте высотой около 3 м (см. рис. 3). Входное сопротивление антенного усилителя достигало 1 ГОм. МА представляла собой секционированный индукционный датчик с 30 тыс. витков, намотанных на ферритовом сердечнике длиной 1 м и диаметром около 5 см.



Рис. 3. Расположение вертикальной электрической антенны на станции «Беллинсгаузен»

Расположение ЭА на станции показано на рис. 3. При ее размещении пришлось использовать пересеченный рельеф местности, чтобы уйти от прямой видимости антенны штатного КВ передатчика станции, работа которого вызывала перегрузку входных цепей приемных устройств. МА была закопана, чтобы снизить ветровые помехи. Она была ориентирована вдоль перпендикуляра к направлению на источник поля. Расстояние от пункта регистрации до антенн составляло около 100 м (МА) и 300 м (ЭА).

Приемник прямого усиления представлял собой узкополосный RC усилитель на активных фильтрах верхних и нижних частот. Он обеспечивал полосу селекции $0,8 - 1$ Гц и был настроен на рабочую частоту. Сигнал с выхода фильтра поступал на синхронный детектор, где происходило его дополнительное выделение. Двухплечевой симметричный синхронный детектор имел постоянную времени около 50 с. Опорный сигнал обеспечивался прецизионным генератором ГЗ-110, а его частота отстраивалась от полезного сигнала на $0,01$ Гц. Расстройка приводит к появлению биений на выходе детектора, если от антенны поступает синусоидальный полезный сигнал. Амплитуда биений прямо пропорциональна амплитуде входного сигнала. Если полезный сигнал отсутствует, на выходе детектора наблюда-

ются флуктуации. Чувствительность тракта регулярно проверялось дополнительным генератором ГЗ-110. Калибровка всего комплекса, включая действующую высоту ЭА, была выполнена впоследствии в морских измерениях на борту НИС «Профессор Зубов» с помощью сигналов СДВ станций (*F*, *B* и *A*) навигационной системы «ОМЕГА» [8]. При этом было установлено, что действующая высота вертикальной ЭА при измерениях на суше была близка к 1 м (при высоте металлической мачты 3 м).

Сигнал синхронного детектора фиксировался на ленте многоканального самописца, и биения, возникавшие при приходе полезного сигнала, уверенно обнаруживались визуально. Впоследствии ленты обрабатывались вручную, амплитуда биений считывалась, усреднялась за десять минут и заносилась в таблицу результатов.

Параллельно проводилась дополнительная фильтрация и накопление сигнала с помощью спектроанализатора СК4-72. Для этого выходное напряжение синхронного детектора оцифровывалось спектроанализатором с периодом 4 с (режим внешнего запуска), а затем находился текущий спектр временной реализации. Спектральная компонента биений почти точно попадала в 11 канал анализатора. Этот выход дополнительно подводился к одному из каналов самописца. За счет использования СК4-72 удалось поднять время когерентного накопления до 40 мин, что увеличило отношение сигнал/шум до значений 10 – 12.

Примеры экспериментальных спектров показаны на рис. 4. Два нижних графика отражают временные изменения спектров, зарегистрированных в вертикальной электрической компоненте поля. Верхний график дает спектр горизонтальной магнитной компоненты, перпендикулярной направлению на источник поля. Показаны образцовые спектры, наблюдавшиеся не столь уж редко. Пик на частоте полезного сигнала становился менее заметным при возрастании локальных помех или в ситуации, когда короткая посылка полезного сигнала занимала не весь сорокаминутный временной интервал.

2. Экспериментальные результаты.

Обзорная запись результатов наблюдений приведена на рис. 5. Верхний график слева показывает непрерывные изменения вертикального электрического поля, а нижний левый – горизонтального магнитного. По оси абсцисс отложено время наблюдения в днях, где показаны текущие даты февраля 1989 г. (время московское). По вертикальной оси отложена амплитуда поля в условных единицах. Тонкие линии соответствуют экспериментальным данным, снятым с СК4-72 с шагом 0,5 ч, а жирные линии дают скользящее среднее по плюс-минус пяти точкам. Вертикальные

линии со стрелками отмечают моменты восхода и захода солнца в пункте наблюдения.

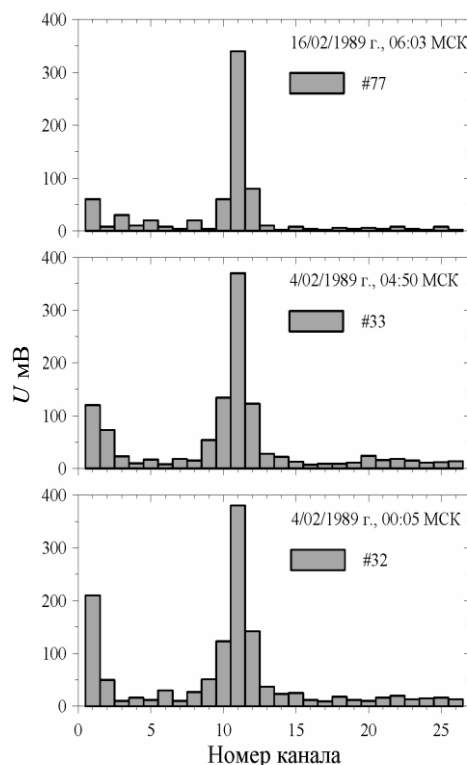


Рис. 4. Образцы спектров, накопленных на СК4-72 за 40 мин. Цифры на графиках показывают московское время окончания накопления данных и порядковый номер фрагмента записи

Измерения проводились в период, когда моменты восхода и захода солнца можно считать постоянными за все время наблюдений. Горизонтальная полоса вверху иллюстрирует чередование дня и ночи в пункте наблюдения. Видно, что день заметно длиннее ночи, так как у наблюдателя – полярное лето.

Правая колонка графиков рис. 5 содержит средние суточные вариации. В ансамбль для электрического поля вошли девять суток измерений, а для магнитного поля – шесть суток. Здесь по горизонтальной оси отложено мировое время в часах. Усредненные вариации показаны жирной линией с точками, а вертикальные отрезки показывают доверительный интервал, отвечающий 80%-ной доверительной вероятности. Последовавшие морские измерения позволили провести абсолютную калибровку электрической антенны, поэтому наблюдавшееся электрическое поле было пересчитано в децибеллы относительно 1 В/м. Данные для магнитного поля по-прежнему даны в относительных единицах. С помощью вертикальных линий со стрелками указаны моменты восхода и захода солнца в пункте наблюдения. Очевидно, что уровень обеих компонент поля ночью выше, чем днем.

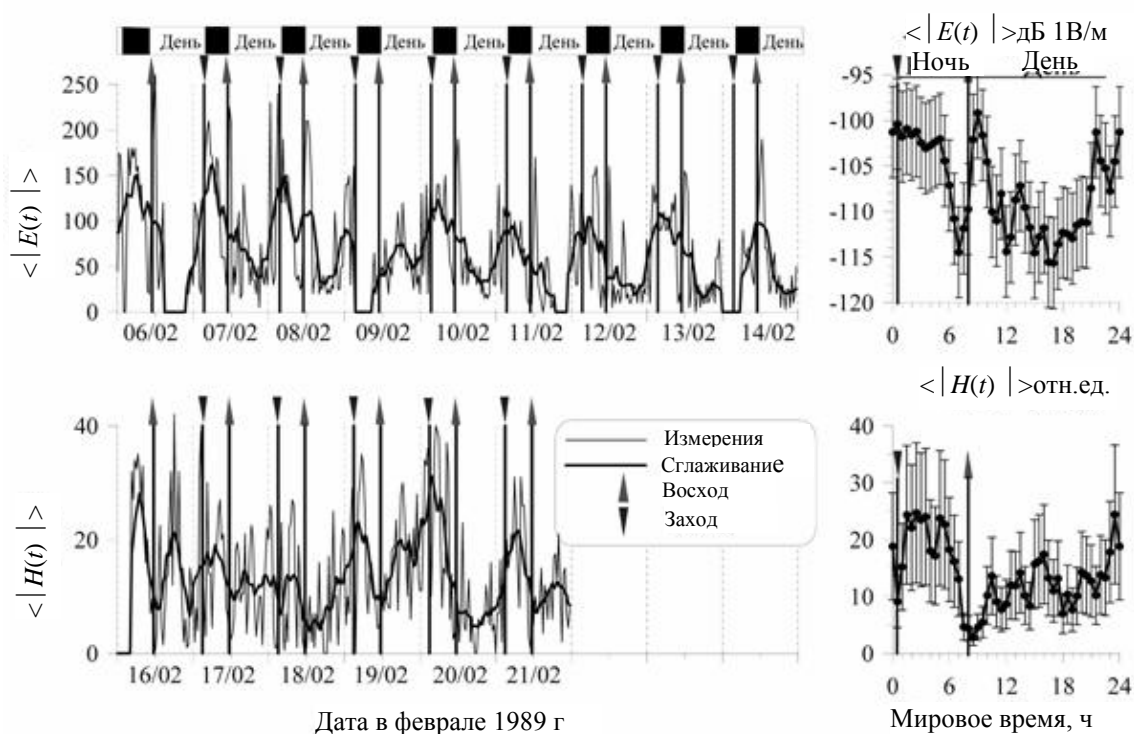


Рис. 5. Обзорные графики экспериментальных данных, полученных на антарктической станции «Беллинсгаузен»

Таким образом, экспериментальные записи показывают, что неоднородность ионосферы день – ночь заметно влияет на уровень принимаемого сигнала. Регулярное возрастание амплитуды начиналось перед заходом солнца в пункте наблюдения, причем эффект отмечался в обеих компонентах поля. Последнее обстоятельство говорит о его связи с затуханием радиоволн на трассе распространения, когда потери в ночном волноводе уменьшаются. Высокий уровень поля сохранялся всю ночь и заметно уменьшался непосредственно перед восходом. В момент восхода и сразу после него в амплитуде электрического поля наблюдался непродолжительный резкий максимум. В течение дня поле оставалось малым, постепенно увеличиваясь к ночи. Поведение магнитной компоненты несколько отличалось от поведения электрической: узкий локальный пик амплитуды после восхода солнца в записи магнитного поля отсутствовал.

Обзорный график рис. 5 был построен при «слепом» усреднении данных. Если же в обработку включить только те интервалы, когда заведомо принимался искусственный сигнал, то мы получим суточные вариации амплитуды, показанные на рис. 6. Здесь по оси абсцисс указано мировое время в часах, а средняя амплитуда искусственного сигнала показана в виде гистограммы. По оси ординат использована шкала в деци-

беллах, где 0 дБ отвечает амплитуде вертикального электрического поля в 5 мкВ/м. Как видно, общее поведение амплитуды во времени сохранилось, однако диапазон суточных изменений уменьшился, теперь они не превышают 9 дБ, причем средняя дневная амплитуда отличается от ночной приблизительно на 4 дБ при примерно таком же по величине дополнительном максимуме амплитуды сразу после восхода.

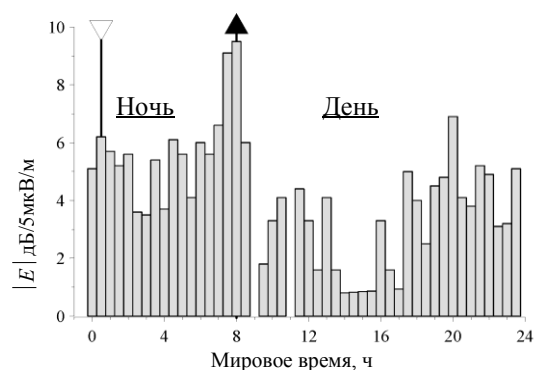


Рис. 6. Усредненные данные эксперимента по приему искусственного сигнала

3. Геометрия эксперимента. Можно предложить несколько вариантов объяснения опытных данных, но в каждом из них окажется

существенным положение границы день – ночь (терминатора) относительно трассы распространения. Перечислим возможные механизмы. Локальный пик в электрическом поле после восхода солнца мог быть обусловлен распространением вдоль терминатора волны типа шепчущей галереи, пока корреспондирующие пункты находятся вблизи перехода день – ночь. Такое объяснение возможно, если терминатор резкий, т. е. изменения ионосферы происходят на малых пространственных масштабах.

Эффект мог быть обусловлен сложением прямой и отраженной от утреннего терминатора волн. Волна от источника падает на границу день – ночь под скользящим углом (см. ниже), что должно обеспечить хорошее отражение. Отсутствие эффекта в горизонтальном магнитном

поле можно связать с ориентацией интерферирующих векторов прямой и отраженной от терминатора волн.

Привычные понятия «трасса распространения» или «отражение волн от терминатора» должны использоваться в диапазоне СНЧ с большой осторожностью. Действительно, чтобы говорить о «скользящем распространении» или об «отражении» волны, нужно сначала оценить «ширину радиолуча», т. е. размер первой зоны Френеля. Эта зона построена на рис. 7, где на картах мира в прямоугольной проекции показаны дуга большого круга, соединяющая корреспондентов (геометрическая трасса распространения), и охватывающая ее первая зона Френеля.

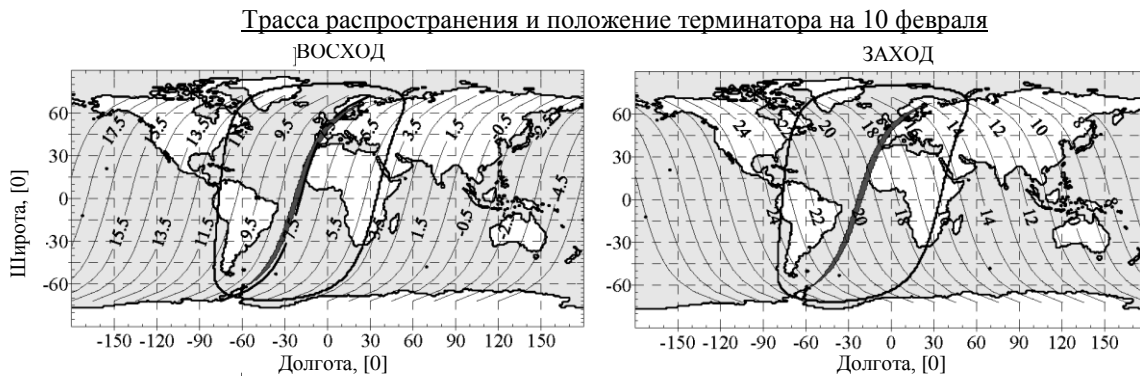


Рис. 7. Карта мира с нанесенной трассой распространения и первой зоной Френеля. Положения утреннего (слева) и вечернего (справа) терминаторов в различные моменты мирового времени указаны на графике цифрами

Источник и наблюдатель расположены в северном и южном полушариях и обозначены ромбами. Рисунок показывает ширину «радиолуча» или «трассы распространения» (первую зону Френеля). Здесь же тонким контуром, прилегающим к геодезической линии источник – приемник, обозначена «зона 500» – это первая зона Френеля, получаемая при повышении рабочей частоты в 500 раз, т. е. до 4,1 кГц. Из-за большой длины трассы и низкой рабочей частоты первая зона Френеля охватывает примерно 110° по долготе, так что в нее почти полностью попадают Африка и Южная Америка. Даже ширина «зоны 500» оказывается близкой к 4°, терминатор проходит это расстояние на экваторе примерно за четверть часа. Ясно, что граница день – ночь будет пересекать первую зону Френеля около 6 ч (если мы говорим о равноденствии, когда эта граница совпадает с меридианом). Ожидать отражений при таких неимоверно размытых «лучах» по видимому неуместно, как впрочем неуместно говорить и о волнах типа шепчущей галереи.

Интуитивно ясно, что можно попытаться разбить сутки на четыре примерно одинаковых

периода. В течение одного из них вся трасса находится на освещенной стороне Земли, в течение другого – она расположена в ночном полушарии, а два оставшихся интервала отвечают «смешанным условиям распространения». К сожалению, эти ожидания оказались далеки от реальности. На рис. 8 приведены две системы геодезических линий. Это дуги большого круга, соответствующие последовательным положениям границы день – ночь (терминатора) на восходе (левый график) и на заходе солнца (правый график). Расчет выполнен на 10 февраля 1989 г. Моменты мирового времени, отвечающие линиям терминатора, указаны на соответствующих линиях цифрами.

Как видно из левого графика рис. 7, утренний терминатор практически «параллелен» трассе. Когда мировое время равно 7,5 ч, то в точке источника солнце уже взошло, а сам восход попадает в точку трассы, лежащей примерно на Гринвичском меридиане. «Параллельный» терминатор пересекает геометрическую трассу распространения очень быстро, чуть дольше, чем за один час (соответствующие времена построены на рис. 8).

Что же касается вечернего терминатора, то он почти перпендикулярен трассе и поэтому пересекает ее около 11 ч.

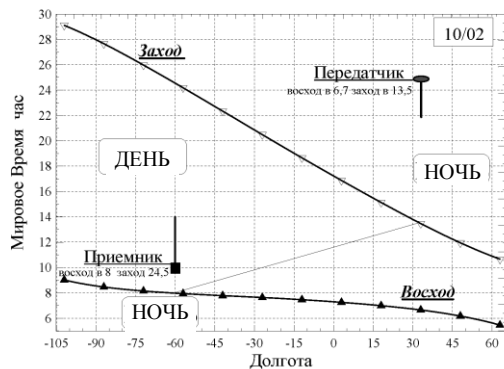


Рис. 8. Расчетные времена восходов и заходов солнца (мировое время в часах) на поверхности Земли в точке расположения передатчика и приемника

Восход солнца в феврале происходит почти в одно время на всей трассе распространения, хотя долготы источника и наблюдателя отличаются более, чем на 90° (шесть часовых поясов). Долготная зависимость времен восхода и захода солнца в точках трассы для 10 февраля показана на рис. 8. Здесь по горизонтальной оси отложена долгота в градусах, а по вертикальной — мировое время в часах. Время восхода на трассе показано кривой с треугольниками вершиной вверх (восход), а времена захода — кривой с треугольниками вершиной вниз (заход). Видно, что над источником восход приходится на 6, 7 ч. мирового времени, а заход — на 13,5 ч. У наблюдателя те же события происходят в 8 и в 24,5 ч мирового времени соответственно. Таким образом, периоды восхода и захода на трассе сильно отличаются по длительности. С 8 до 13,5 ч мирового времени трасса распространения находится на дневной стороне Земли, а с 0,5 по 6,7 ч — на ночной. С 6,7 по 8 ч (1,3 ч) и с 13,5 по 24,5 ч (11 ч) трасса распространения — «смешанная». Указанные времена относятся к чисто геометрической, идеальной трассе. Если же учесть размер первой зоны Френеля, то даже на «параллельной трассе» утренний терминатор должен влиять на поле, начиная с 3,5 и заканчивая 12 ч мирового времени.

4. Интерпретация экспериментальных данных с помощью элементарных соображений. Наблюдавшиеся изменения амплитуды, строго говоря, необходимо объяснять с помощью дифракции радиоволн на неоднородности день — ночь [7, 9]. Такое рассмотрение громоздко и требует отдельной публикации. Мы приводим простейшие оценки характера и величины суточных изменений поля, базирующиеся на самых совре-

менных данных о распространении искусственного СНЧ радиосигнала [3, 4].

Переход от дня к ночи приводит к одно-временному изменению двух параметров волновода: постоянной распространения и высоты нижней ионосферы. В ночных условиях затухание радиоволн уменьшается, и при прочих равных условиях амплитуда поля должна возрастать. Однако ночная ионосфера начинается выше, поэтому коэффициент возбуждения поля, обратно пропорциональный высоте ионосферы над приемником и передатчиком, уменьшается ночью. Так переход от дневных условий к ночным связан с эффектами, действующими во взаимно противоположных направлениях. Заранее неясно, какой из них окажется сильнее. Мало того, существует такая дистанция от источника, когда оба эффекта взаимно компенсируются, и амплитуда поля должна оставаться неизменной при переходе от дня к ночи. Оценка этой дистанции с учетом геометрического расширения фронта радиоволны и сферичности волновода была приведена в работе [4], где она оказалась равна ~ 3 Мм.

В работе [3] подведены итоги многолетних измерений сигналов Висконсинского СНЧ передатчика (Wisconsin Test Facility — WTF) и указаны эффективные параметры волновода, найденные из опытных данных. Мы воспользуемся данными для частоты 76 Гц (см. табл. 1). Незначительное отличие частоты, на которой проводились измерения, практически не повлияет на их величину, так утверждает в работах [3, 4]. Как видно из табл. 1, дневные и ночные постоянные распространения отличаются от среднего значения примерно на $\pm 6\%$ в реальной части (фазовая скорость) и на $\pm 20\%$ в мнимой части (затухание), что согласуется с независимыми литературными моделями постоянной распространения на СНЧ [4, 7, 9, 10].

На рис. 9 мы приводим результаты измерений и сопоставляем их с простыми моделями.

Линия с ромбами была получена следующим образом. Поскольку изменения погонного затухания от дневных условий к ночным составляют 0,51 дБ/Мм, а длина трассы распространения равна 16,25 Мм, то ночной уровень поля должен превышать дневной на 8,3 дБ. Однако дневная ионосфера расположена ниже, чем ночная, и изменения множителя возбуждения действуют в противоположном направлении, увеличивая поле в дневном волноводе на 2,3 дБ (см. табл. 1). Поэтому при переходе от дня к ночи уровень поля должен увеличиться на 6 дБ. Выбрав дневной уровень поля равным 1 дБ и линейно интерполируя изменения амплитуды во времени, мы и получаем «линейные изменения» во времени (линия с ромбами на рис. 9), которые не так уж плохо согласуются с измерениями.

Таблица 1

Параметры дневного и ночного волноводов, использованные в вычислениях

Величина	Дневные условия	Ночные условия	Среднее	Отклонения от среднего
Погонное затухание α , дБ/Мм	1,33	0,82	1,075	0,255
Обратная фазовая скорость, c/V	1,245	1,12	1,1825	0,625
«Электрическая высота» h_E , км	55,1	75,6	65,35	10,25
«Магнитная высота» h_M , км	75,6	91,5	83,55	7,95
Коэффициент возбуждения, дБ	-0,8	-3,1	0,8209	0,091
S_V	$1,245 - i 0,089$	$1,12 - i 0,055$	$1,1825 - i 0,072$	$0,0625 - i 0,017$
ν	$13,12 - i 0,973$	$11,76 - i 0,6$	$12,44 - i 0,7865$	$0,68 - i 0,1865$

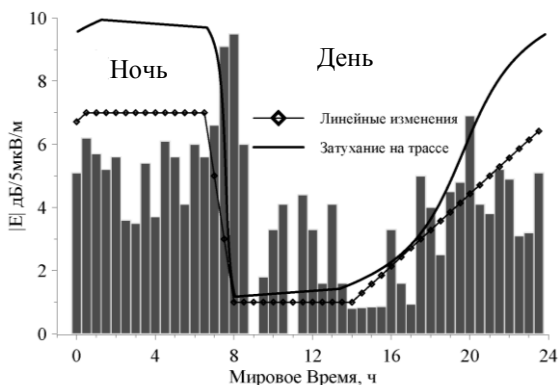


Рис. 9. Данные эксперимента

Сплошная кривая на рис. 9 показывает результаты иного расчета. Здесь отличия в множителе возбуждения поля игнорируются, но при этом более корректно учитываются временные изменения длины дневного и ночного участков трассы распространения. С этой целью были найдены координаты точки $M(\varphi_k, \theta_k)$, лежащей на геометрической трассе распространения, такой что в фиксированный момент мирового времени здесь наблюдается восход или заход солнца. Точка M делит трассу на дневную и ночную части, и мы рассчитываем текущую амплитуду y_k , измеряемую в децибеллах, по формуле

$$y_k = -1,33d_D - 0,82d_N, \quad (1)$$

где d_D — длина освещенного, а d_N — длина затененного участка трассы. Расчетные изменения амплитуды теперь не столь прямолинейны (сплошная линия на рис. 9), однако их диапазон оказывается завышенным из-за пренебрежения изменениями в коэффициенте возбуждения поля.

Упрощенные оценки в обоих случаях хорошо согласуются с наблюдениями, но при этом остаются особенности, не объясняемые элементарными соображениями. Например, рост поля в точке наблюдения после прохода утреннего терминатора над передатчиком и его приближении к наблюдателю. При этом трасса распространения и граница день – ночь почти полностью совпадают. Объяснение, связанное с отражением радиоволн от терминатора, уже упоминалось. Действительно, коэффициент отражения волн при скользких углах падения велик, а разность хода прямой и отраженной волн может обеспечить интерференционный максимум. Однако корреспонденты должны располагаться по одну сторону от терминатора, тогда как рост амплитуды наблюдался *после* восхода солнца над источником, но *перед* восходом в пункте наблюдения. Эта деталь исключает как отражения от терминатора, так и механизм типа волн шепчущей галереи.

Можно предложить еще одно объяснение. Известно, что излучение антенны КИ в волновод Земля – ионосфера создается как бы двумя разнесенными в пространстве вертикальными электрическими диполями с противоположными токами. Наблюдатель регистрирует разность полей, излученных этими диполями. Расстояние между диполями равно длине горизонтального провода 108 км, соединяющего заземления [6]. Это расстояние много меньше длины волны, и в однородном промежутке Земля – ионосфера можно получить выражения для полей с помощью простого дифференцирования [1, 2]. Максимум излучения направлен вдоль линии разнеса диполей, поэтому источник, показанный на рис. 1, излучает вдоль параллели. Ситуация изменится в неоднородном промежутке, когда высота

ионосферы над одним из диполей станет отличаться от высоты над другим. Равенство коэффициентов возбуждения вертикальными диполями нарушится, и диаграмма направленности повернется и исказится. На восходе излучение восточного диполя увеличится, а западного – останется прежним. Тогда диаграмма направленности повернется, изменится глубина и положение минимумов, а также величина максимумов излучения. Экспериментальные данные качественно соответствуют такому эффекту, так как восход солнца над передатчиком сопровождается возрастанием поля, а заход – связан с его уменьшением, правда не столь заметным.

Приведенные соображения имеют качественный характер. Работы об излучении рамочной СНЧ антенны под неоднородной по высоте ионосферой нам не известны, а имеющиеся экспериментальные данные характеризуются весьма скромной статистикой. Для уверенных выводов

необходимы специальные исследования и более обширный экспериментальный материал.

5. Поля в модели полностью дневного и полностью ночного промежутков Земля–ионосфера. До сих пор мы не использовали формальное описание распространения СНЧ радиоволн и оперировали понятиями задачи с плоской геометрией. Изменения амплитуды поля с дистанцией в замкнутой сферической полости немонотонны. Поле вначале убывает, но при подходе к антиподу источника возрастает и начинает осциллировать. Ниже мы приведем дистанционные зависимости амплитуды в однородном резонаторе Земля – ионосфера с полностью ночной или полностью дневной ионосферой. Такой расчет позволит оценить максимальную величину и характер изменений амплитуды в неоднородном промежутке. Вертикальная электрическая и горизонтальные магнитные компоненты поля, создаваемые рамочной СНЧ антенной, описываются следующими уравнениями [2, 7]:

$$E = \frac{-iv(v+1)}{\omega} \frac{M(\omega)}{4h_E a^3 \epsilon_0} \cos \eta \frac{P_v^1[\cos(\pi - \theta)]}{\sin \pi v}; \quad (2)$$

$$H_\varphi = \frac{-M(\omega)}{4h_M a^2 \sin \pi v} \cos \eta \left[v(v+1) P_v^1[\cos(\pi - \theta)] + \operatorname{ctg} \theta P_v^1[\cos(\pi - \theta)] \right]; \quad (3)$$

$$H_\theta = \frac{-M(\omega)}{4h_M a^2} \sin \eta \frac{P_v^1[\cos(\pi - \theta)]}{\sin \pi v}. \quad (4)$$

Здесь a – радиус Земли; $M(\omega)$ – эквивалентный магнитный момент рамочной антенны в $\text{А} \cdot \text{м}^2$; множители $\cos(\eta)$ и $\sin(\eta)$ учитывают угловую диаграмму направленности излучающей антенны (угол η отсчитывается от направления на восток из центра антенны); ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; h_E и h_M – электрическая и магнитная высоты ионосферы соответственно; θ – угловое расстояние от центра антенны до наблюдателя; $P_v^1[\cos(\pi - \theta)]$, $P_v^1[\cos(\pi - \theta)]$ – функция и присоединенная функция Лежандра. В расчетах принято, что источник имеет момент тока $M(\omega) = 10^{11} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ (см. [4 – 6]).

Соотношения (2) – (4) легко получить из решения для вертикального электрического диполя в промежутке Земля – ионосфера [1, 2, 7]. Поскольку на СНЧ горизонтальные токи не излучают, рамка представляет собой комбинацию двух разнесенных вертикальных электрических диполей [1, 2]. Принимаемое поле есть разность излучений разнесенных диполей. На расстояниях, больших по сравнению с размерами антенны, разность заменяется дифференциалом поля по угловому расстоянию θ с учетом ориентации рамки. Так получают формулы (2) – (4).

Если наблюдатель удален от источника на расстояние, сравнимое с размером антенны, формулы изменятся. Например, компонента поля H_φ в центре рамочной антенны (и его антипода) точно обратится в нуль, свойство, не учитываемое в (3). Поле H_θ в центре антенны и ее антипода отличается от (4), оно не равно нулю и направлено перпендикулярно плоскости рамки, как и полагается полю витка тока. Поскольку мы используем большие расстояния от антенны и от ее антипода, формулы (2) – (4) остаются применимыми. При выполнении расчета зависимостей монохроматического поля от дистанции был использован алгоритм ускорения сходимости рядов зональных гармоник, предложенный в работе [11] и подробно описанный в [7].

Постоянная распространения СНЧ радиоволн $\mathcal{V}(\omega)$ связана с параметрами, перечисленными в табл. 1 следующими уравнениями

$$v(v+1) = (ka)^2 S_v^2, \quad (5)$$

где ω – круговая частота; $k = \omega/c$ – волновое число в свободном пространстве. Комплексный синус угла падения волны на ионосферу находят из уравнения [12]

$$S_v = c/V - i(5,49)\alpha/f, \quad (6)$$

откуда

$$\nu = \sqrt{1/4 + (ka)^2 S_v^2} - 1/2. \quad (7)$$

Результаты расчета амплитуд полей $E(D)$ и $H_\phi(D)$ показаны на рис. 10, где вдоль оси абсцисс отложена дистанция от центра передающей антенны D , измеренная в мегаметрах. Вдоль вертикальных осей отложена амплитуда поля. Элек-

трическое поле измеряется в децибеллах относительно 1 В/м, а магнитное – относительно 1 А/м. Вставки на графиках подробно показывают поведение поля в окрестности станции «Беллинсгаузен». Сплошные линии отвечают полям, рассчитанным в модели «полностью ночного волновода», а кривые с точками – полям «полностью дневного волновода».

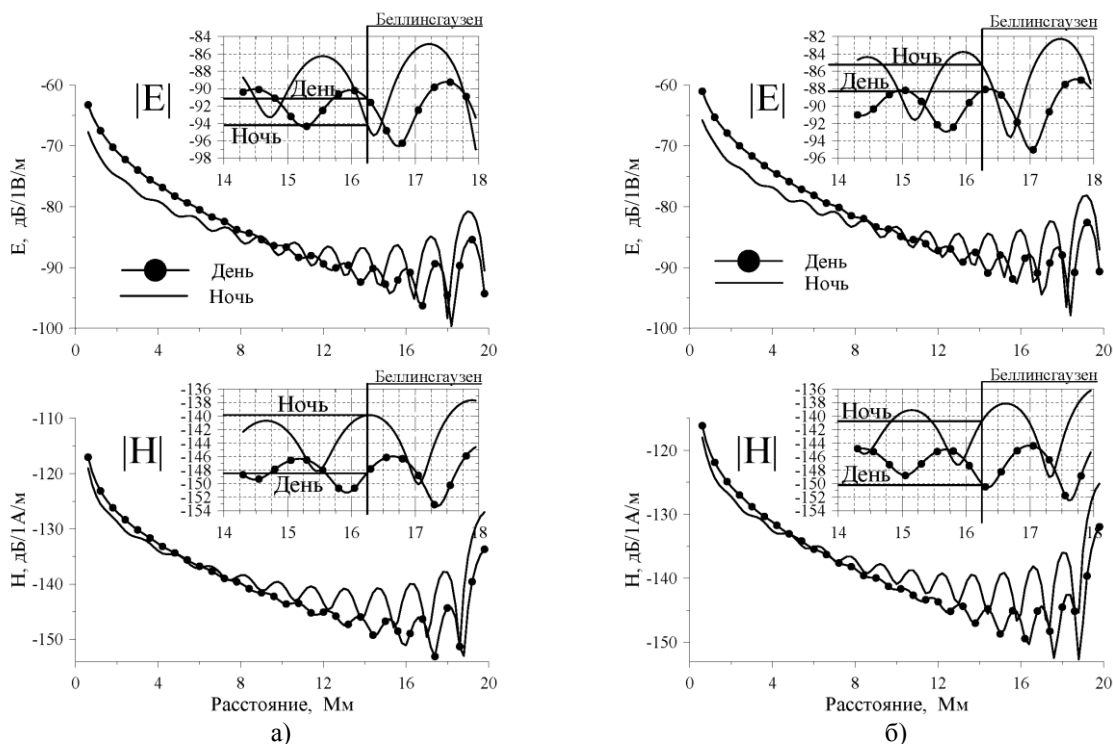


Рис. 10. Дистанционные зависимости полей рамочной антенны в сферической полости Земля – ионосфера для двух моделей постоянной распространения: а) – исходная модель, взятая из литературных данных [3]; б) – модифицированная фазовая скорость

В сферическом промежутке Земля – ионосфера амплитуда убывает с расстоянием, если дистанция до источника меньше 8 – 10 Мм, сюда доходит очень слабая антиподная волна. С увеличением расстояния амплитуда антиподной волны возрастает, и на графике появляются интерференционные замирания. Амплитуда замираний превышает изменения поля, связанные с переходом от полностью ночного волновода к дневному, если расстояние до источника превосходит 17 Мм.

Как и ожидалось, уровень поля на малых расстояниях в дневном волноводе выше, чем в ночном, что обусловлено изменением коэффициента возбуждения волн. Амплитуды в дневном и ночном волноводах становятся равными на дистанциях около 6 Мм для магнитного поля и 8 - 12 Мм – для электрического. Эта величина превышает 3 Мм, указанные в работе [4], где игнорировалась интерференция и использовалась другая модель волновода. Модель постоянной распространения

[3] предсказывает, что на станции «Беллинсгаузен» амплитуда электрического поля в «полностью дневном» промежутке *превышает* на 3 дБ поле «полностью ночного» промежутка. В магнитном же поле ситуация обратная – ночной уровень *превышает* дневной на 8 дБ (см. табл. 2). Эти данные противоречат результатам наблюдений, что вероятнее всего свидетельствует о погрешности в модели фазовой скорости волны.

На рис. 10 горизонтальными линиями на вставках показаны расчетные уровни поля в дневных и ночных условиях. Видно, что противоречие действительно может быть вызвано интерференцией. Так, в модели [3] (левые графики) на дистанции в 16,75 Мм наблюдается уменьшение от ночи ко дню, равное 8 дБ в электрическом поле и на 3 дБ в магнитном. Очевидно, что для соответствия эксперименту следует поправить величину фазовой скорости в модели [3]. Малое изменение $Re\{\nu\}$, равное $\pi/64 \approx 0,05$ радиан

(около 0,4%), сдвинет интерференционный минимум поля на место максимума. Поскольку постоянная распространения в литературе оценивалась по измерениям на трассах, не превышавших две длины волны, фазовые набегги не могли быть большими, и числовые значения параметра c/V могли оказаться недостаточно точны. Экспериментальные данные говорят о необходимости поправить эту модель.

Дистанционные зависимости поля на рис. 10 показаны в исходной модели [3] и в линейной модели постоянной распространения, основанной на данных шумановского резонанса [7, 10], когда используется частотная зависимость вида: $v(f) = v_1 - i v_2 = (f - 2)/6 - i f / 70$. Мы учли неоднородность день – ночь в этой модели, как изменение фазовой скорости волны на $\pm 10\%$, а все остальные параметры брали из модели [3]: $\text{Re}\{v_1\}_D = 14,666$ и $\text{Re}\{v_1\}_N = 12,0$, что отвечает обратным фазовым скоростям $c/V_D = 1,3872$ и $c/V_N = 1,232$. Индекс D обозначает дневной волновод, а индекс N – ночной. Малая поправка к фазовой скорости сдвинула картину интерференции на рис. 10. На вставках вертикальной линией обозначена длина трассы, а горизонтальными линиями с надписями «день» и «ночь» – уровни поля полностью дневного и ночного волноводов. Как видно, модификация приводит к желаемому результату, и дневной уровень оказывается ниже ночного в обоих компонентах поля.

На расстоянии 16,3 Мм изменения от ночи ко дню составляют 3 дБ в электрическом поле и 9 дБ в магнитном, что ближе к измерениям. Конечно, можно подобрать такую модель, чтобы уровень поля изменялся, как в наблюдениях. Вопрос об адекватности такой модели все равно останется открытым, поскольку не ясно, что произойдет на других, тоже значительных дистанциях в зоне интерференции, для которых пока еще нет экспериментальных данных. Очевидно, что желательно измерить постоянную распространения в нескольких точках на большом удалении от источника. Тогда интерференция прямой и антиподной волн позволила бы уточнить фазовую скорость.

Нами применялся упрощенный подход: чисто дневной или чисто ночной волновод. Очевидно, что неоднородность день – ночь изменяет пространственное распределение поля. Пусть, например, КИ находится прямо под терминатором, а изменениями в диаграмме излучения мы можем пренебречь. Тогда антипод источника сдвинется в дневное полушарие, поскольку амплитуда волн, пришедших с ночной стороны окажется выше чем у волн, пришедших из дневной половины. Искажится и положение интерференционных узлов поля. Подобные эффекты не описываются моделями чисто дневного или чисто ночного промежутков. Поэтому модифицированную модель постоянной распространения желательно испытать в неоднородном резонаторе. Такая задача должна быть рассмотрена отдельно, что мы надеемся сделать в будущем.

Таблица 2

Расчетные уровни поля на станции «Беллинсгаузен» в моделях дневного и ночного волноводов

Дистанция D , Мм	Поле E_D , дБ (день)	Поле E_N , дБ (ночь)	Разность $E_D - E_N$	Поле H_D , дБ (день)	Поле H_N , дБ (ночь)	Разность $H_D - H_N$
16,3	-91,598	-94,989	3,4	-127,31	-129,51	-8
16,75	-96,606	-88,231	-8,4	-125,61	-133,26	-2,4

Выводы. Нами были обработаны записи амплитуды СНЧ радиоволны, выполненные на большом расстоянии от источника. Предсказания опубликованных моделей хорошо согласуются с измеренным средним уровнем поля.

В эксперименте уверенно наблюдается переход день – ночь. Дневной уровень ниже ночного на 5 – 6 дБ в вертикальной электрической компоненте и на 4 – 5 дБ в горизонтальной магнитной компоненте. Величина изменений и их временной характер согласуются как с общими представлениями об изменении затухания поля и коэффициента возбуждения волновода, так и с расположением трассы распространения относительно утреннего и вечернего терминаторов.

Модели распространения в полностью ночном или полностью дневном волноводе дают данные, противоречащие опытным. Отклонения

вероятнее всего обусловлены неточностями в задании фазовой скорости радиоволны ибо она определяет положение интерференционных минимумов и максимумов поля. 10%-ная коррекция фазовой скорости позволяет согласовать модель с экспериментом. Необходимо уточнить модель распространения, с помощью изменений амплитуды и фазы СНЧ радиоволн в удаленных пунктах наблюдения. Желательно иметь дистанционные разрезы поля, охватывающие несколько интерференционных минимумов и максимумов.

Подобные уточнения не рассматривают дифракцию радиоволн на границе день – ночь. Решение такой задачи планируется в будущем при использовании представленной в настоящей работе уточненной модели распространения.

Автор выражает искреннюю благодарность И. Лесникову за активное участие в изме-

рениях 34-й Советской Антарктической Экспедиции.

Обработка данных была выполнена при поддержке гранта №2070 НТЦУ.

1. *Chang D. C., Wait J. R.* ELF propagation along a horizontal wire located above or buried in the earth // IEEE Trans. Communications. - 1974. - Com-22. - P. 421-427.
2. *Burrows M. L.* ELF communications antennas. - London: Peter Peregrinus, 1978. - 245 p.
3. *Bannister P. R.* Further examples of seasonal variations of ELF radio propagation parameters // Radio Science. - 1999. - 34. - P.199-208.
4. *Fraser-Smith, A.C. and P.R. Bannister,* Reception of ELF signals at antipodal distances// Radio Science. - 1998. - 33. - P.83-88.
5. *Велихов Е. П., Жамалетдинов А. А., Собчаков Л. А. и др.* Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ – диапазона. // Докл. РАН. - 1994. - 338. - С.106-109.
6. *Беляев П. П., Поляков С. В., Ермакова Е. Н. и др.* Первые эксперименты по генерации и приему искусственных УНЧ излучений (03 – 12 Гц) на дистанции 1500 км // Изв. вузов. Радиофизика. - 2002. - 45. - С.151-162.
7. *Nickolaenko A. P., Hayakawa M.* Resonances in the Earth-ionosphere cavity. - Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 2002. - 380 p.
8. *Nickolaenko A. P.* ELF/VLF Propagation measurements in the Atlantic during 1989 // *J. Atmos. Terr. Phys.* - 1995. - 57. - С.821-833.
9. *Николаенко А. П.* Рассеяние СНЧ радиоволн на глобальных неоднородностях полости Земля - ионосфера // Изв. вузов. Радиофизика - 1986 - 29. - С.33-40.
10. *Nickolaenko A. P.* ELF radio wave propagation in a locally non-uniform Earth-ionosphere cavity // *Radio Science* - 1994. - 29. - P.1187-1199.
11. *Николаенко А. П., Рабинович Л. М.* Ускорение сходимости рядов зональных гармоник в задаче о шумановском резонансе.- Харьков, 1972.- 20 с. (Препр./АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 18).
12. *Wait J. R.* Electromagnetic waves in stratified media. - Oxford, New York, Paris: Pergamon Press - 1962. - 382 p.

IMPACT OF IONOSPHERE DAY – NIGHT NON-UNIFORMITY ON AMPLITUDE OF ELF RADIO SIGNAL

A. P. Nickolaenko

Diurnal amplitude variations were processed of man-made ELF radio wave recorded at the Antarctic station “Bellinshausen”. The

propagation path was about 16 Mm long. Average level of the field corresponds to the published data. Diurnal amplitude variations present in the record arise from the day – night non-uniformity of the waveguide. The ambient day level is by 5 – 6 dB lower than that at the ambient night conditions in the vertical electric field component, it is by 4 – 5 dB lower in the horizontal magnetic field. Computational results are presented for the fields in the spherical Earth – ionosphere cavity with the ‘whole day’ and ‘whole night’ ionosphere models taken from literature. Model data contradict to observations. Discrepancy might arise from an inexact value of the model phase velocity of radio waves, which governs the position of interference maxima and minima. Model data match the experiment after the phase velocity is corrected by 10%. Since the ‘whole day’ and the ‘whole night’ ionosphere models do not account for the wave diffraction at the day-night interface, we conclude that more exact modeling is desirable.

Key words: radio waves propagation, non-uniform duct, terminator.

ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТІ ІОНОСФЕРИ ДЕНЬ-НІЧ НА АМПЛІТУДУ ЗНЧ РАДІОСИГНАЛУ

О. П. Ніколаєнко

Оброблені записи денних змін амплітуди наднизькочастотної (ННЧ) радіохвилі, що зареєстровано на антарктичній станції “Беллінсгаузен”, довжина траси поширення біля 16 Мм. Середній рівень поля добре узгоджується із літературними даними. У записах присутні денні зміни амплітуди, що зумовлені неоднорідністю нижньої іоносфери день – ніч.

Денний рівень поля нижче нічного на 5 - 6 дБ у вертикальній електричній компоненті поля та на 4 - 5 дБ у горизонтальному магнітному полі. Виконано розрахунки поля сферичного хвильовода Земля – іоносфера для моделей повністю денного та повністю нічного хвильовода, які взяті із літератури. Данні розрахунків суперечать спостереженням, що можливо зумовлено хибним завданням модельної фазової швидкості радіохвилі, що визначає розташування інтерференційних мінімумів та максимумів поля. Розрахунки та вимірювання відповідають одне одному, якщо скорегувати фазову швидкість на 10%. Оскільки однорідні проміжності “повний день” або “повна ніч” не враховують дифракції радіохвилі на термінаторі, робиться висновок про необхідність більш точного моделювання та виконання розрахунків у неоднорідному резонаторі Земля - іоносфера.

Ключові слова: поширення радіохвилі, неоднорідний хвильовід, термінатор.

Рукопись поступила 26 февраля 2007 г.