

## Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения

С. Б. Кашеев, А. В. Зализовский, А. В. Колосков, В. Г. Галушко, И. И. Пикулик,  
Ю. М. Ямпольский, В. И. Куркин<sup>1</sup>, Г. И. Литовкин<sup>1</sup>, А. И. Орлов<sup>1</sup>

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: kascheev@rian.kharkov.ua*

*<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
ул. Лермонтова, 126-а, г. Иркутск, 664033, Россия  
E-mail: kurkin@iszf.irk.ru*

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2009 г.*

Проанализированы результаты измерений спектральных характеристик сигналов КВ диапазона на протяженных радиолиниях во время солнечного затмения 1 августа 2008 г. и в соседние дни. В качестве источников излучения использованы специальные передатчики, расположенные вблизи Иркутска, Норильска и Магадана. Приемные пункты были организованы под Харьковом и на острове Свалбард (архипелаг Шпицберген, Норвегия). Обнаружено, что доплеровский сдвиг сигнала во время затмения обладает одинаковыми характерными особенностями на различных трассах, а его амплитуда приближенно обратно пропорциональна рабочей частоте. Разработана феноменологическая модель временной зависимости доплеровского сдвига сигнала от изменения интегральной освещенности всей радиолинии. Результаты моделирования качественно хорошо совпадают с результатами эксперимента.

### 1. Введение

Измерения спектральных характеристик сигналов коротковолнового диапазона, выполненные в Радиоастрономическом институте НАН Украины (РИ НАНУ) совместно с Институтом солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской АН (ИСЗФ СО РАН), позволили исследовать влияние на их амплитуду и доплеровское смещение частоты (ДСЧ) ионосферных возмущений различной природы [1]. Результаты измерений энергетических параметров имели важное значение для проверки адекватности ионосферных моделей и методов расчета характеристик КВ сигналов. Кроме того, временные зависимости характеристик, полученные в разных геофизических условиях, использованы для моделирования крупномасштабных динамических процессов в ионосфере [2].

Представленная статья продолжает цикл работ по изучению влияния прогнозируемых ионосферных возмущений на характеристики сигналов КВ диапазона на протяженных трассах различной ориентации. Роль генератора возмущения при проведении эксперимента играло полное солнечное затмение (СЗ), которое состоялось над Западной Сибирью 1 августа 2008 г.

Влияние СЗ на физические процессы, протекающие в атмосфере Земли, изучаются в широком диапазоне частот, от оптического до сверхнизкочастотного. Изменения параметров ионосферы, которые влияют на энергетические характеристики КВ сигналов во время затмения, исследованы достаточно полно. К таковым следует отнести уменьшение критических частот различных слоев ионосферы и полного электронного содержания, увеличение высоты от-

ражения при вертикальном и наклонном зондировании и т. п. На сегодняшний день разработаны модели, которые позволяют адекватно описывать вариации этих параметров (см., например, [3]). В то же время изменения частоты и формы спектров сигналов, распространяющихся ионосферным лучом во время затмения, изучены недостаточно [1].

Целью работы являлись экспериментальные исследования вариаций спектральных характеристик пробных сигналов разных частот во время СЗ на нескольких контрольных радиолиниях различной протяженности и направленности, а также разработка модели, связывающей эти изменения с параметрами физических процессов, воздействующих на ионосферу.

В качестве излучающих станций были использованы исследовательские передатчики ИСЗФ СО РАН, расположенные в Сибири и на Дальнем Востоке. Когерентные приемные системы, созданные в РИ НАНУ [4], располагались в Украине и на острове Свалбард (архипелаг Шпицберген, Норвегия).

В ходе измерений получены временные зависимости спектральных характеристик КВ сигналов в период затмения на трассах протяженностью от 2270 до 6500 км для двух рабочих частот. Рассмотрены общие закономерности, являющиеся результатом воздействия СЗ на ионосферу. Отмечены особенности, обусловленные различием рабочих частот и конкретными геофизическими условиями на пробных трассах. Анализ полученных данных позволил разработать феноменологическую модель, связывающую величину ДСЧ сигналов с изменениями интегральной освещенности трассы во время затмения. Результаты моделирования качественно хорошо совпали с экспериментальными данными.

## 2. Методика проведения измерений

В июле–августе 2008 г. ИСЗФ СО РАН и РИ НАНУ была проведена совместная измерительная кампания по исследованию влияния СЗ на спектральные характеристики КВ сигналов, распространявшихся по ионосферным каналам. Измерения проводились на шести трассах, проекции которых на поверхность

Земли показаны на рис. 1. На нем также приведена протяженность трасс. Передающие пункты располагались вблизи городов Иркутск ( $52.75^\circ$  с.ш.,  $103.63^\circ$  в.д.), Магадан ( $59.57^\circ$  с.ш.,  $150.47^\circ$  в.д.) и Норильск ( $69.12^\circ$  с.ш.,  $88.17^\circ$  в.д.). Регистрация зондирующих сигналов осуществлялась в двух пунктах, расположенных в Радиоастрономической обсерватории (РАО) РИ НАНУ (Харьковская область,  $49.67^\circ$  с.ш.,  $36.83^\circ$  в.д.) и на острове Свалбард (архипелаг Шпицберген,  $78.20^\circ$  с.ш.,  $15.83^\circ$  в.д.). Первый пункт был оборудован многоканальным когерентным приемным комплексом [4]. Удаление от передатчиков составляло от 3.45 до 6.5 тыс. км. Второй пункт (расстояние до передатчиков от 2.27 до 4.4 тыс. км) был оснащен двухканальным цифровым приемником, который обеспечивал прием сигналов и первичную обработку в реальном времени в автономном режиме. Управление приемником и последующая ретрансляция данных в РИ НАНУ осуществлялась по сети Интернет.

Траектория движения лунной тени по поверхности Земли была практически перпендикулярна трассам, приемный пункт для которых располагался в РАО (рис. 1). Вблизи этих трасс на рисунке указано время их пересечения центром лунной тени.

Полное затмение Солнца состоялось 1 августа с 9:22 по 11:20 UT. Измерения спектральных характеристик сигналов проводились три дня, с 31 июля по 2 августа: перед, во время и после СЗ. Характеристики в невозмущенные дни 31 июля и 2 августа рассматривались в качестве “опорных” для сопоставления с полученными во время затмения.

Все дни измерений передающие пункты с 3:00 по 15:00 UT излучали непрерывные сигналы на двух частотах  $f_1 = 10999$  кГц и  $f_2 = 12333$  кГц следующим образом. Весь интервал наблюдений разбивался на шестиминутные сеансы, состоящие из трех двухминутных циклов. В течение каждого цикла соответствующий передатчик последовательно излучал на двух пробных частотах по одной минуте на каждой. Последовательность работы передатчиков была следующая: в Иркутске, Магадане, Норильске. Далее шес-

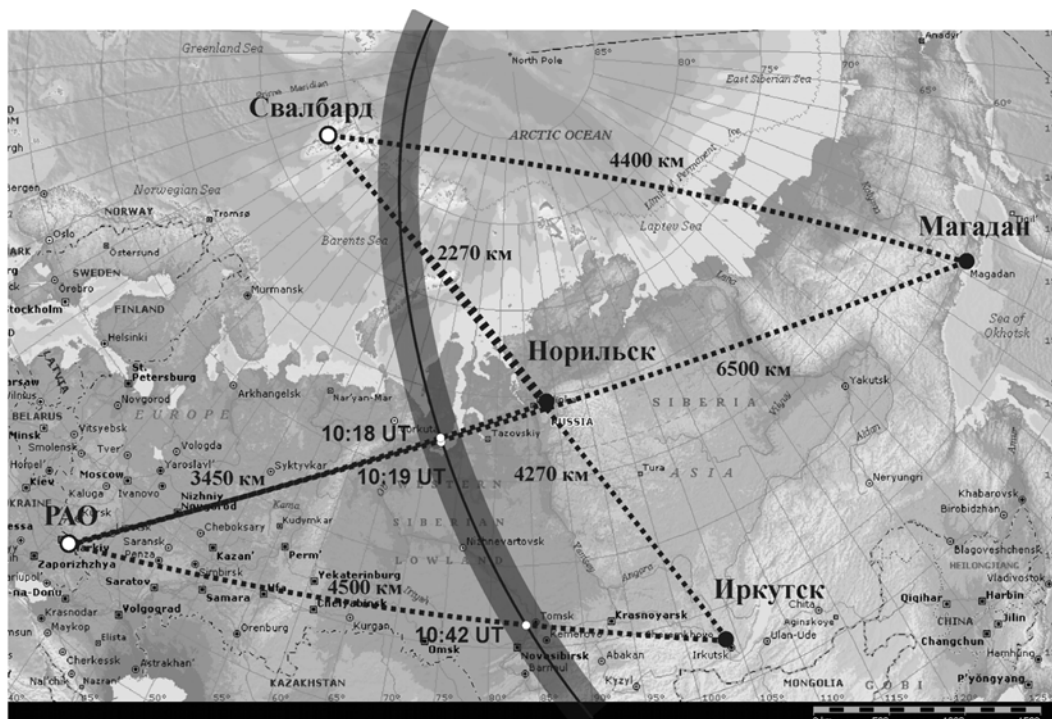


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

тиминутный цикл периодически повторялся. Значения рабочих частот были выбраны в соответствии с модельными прогнозами, сделанными в ИСЗФ СО РАН исходя из условий минимальных потерь на контрольных радиолиниях.

В обоих приемных пунктах осуществлялась непрерывная регистрация сигналов на двух частотах. В реальном времени проводилась спектральная обработка и визуализация динамических спектров, что позволяло контролировать работоспособность измерительного комплекса, помеховую обстановку и управлять усилением приемных каналов. На этапе последующей обработки из непрерывной записи для каждой радиотрассы выбирались минутные интервалы, в течение которых передатчики работали на одной и той же частоте. Для этих интервалов вычислялись мгновенные амплитудные спектры с разрешением 0.17 Гц и с последующим некогерентным усреднением 10-ти спектров. По максимуму усредненного значения спектральной плотности оценивались принятая мощность и ДСЧ.

### 3. Результаты измерений спектральных характеристик сигналов

В приемном пункте вблизи Харькова были получены следующие результаты. Зависимости мощности принятых сигналов от времени, измеренные на всех трассах 31 июля и 2 августа, немонотонны, с большими перепадами по уровню, и весьма сильно отличаются день ото дня. В качестве примера на рис. 2, а приведены сглаженные по трем точкам временные зависимости мощности сигналов, принятых 2 августа из Магадана на двух рабочих частотах. Такие немонотонные изменения мощности объяснялись многомодовой структурой регистрируемых сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями. Выделить влияние СЗ в таких условиях крайне затруднительно. Более регулярный и монотонный характер имели частотные характеристики сигналов для той же трассы (см. рис. 2, б). В утренние часы в ДСЧ сигналов наблюдались положительные сдвиги частоты, обусловленные увеличением ионизации в ионосфере. После восхода электронная концентрация достигала

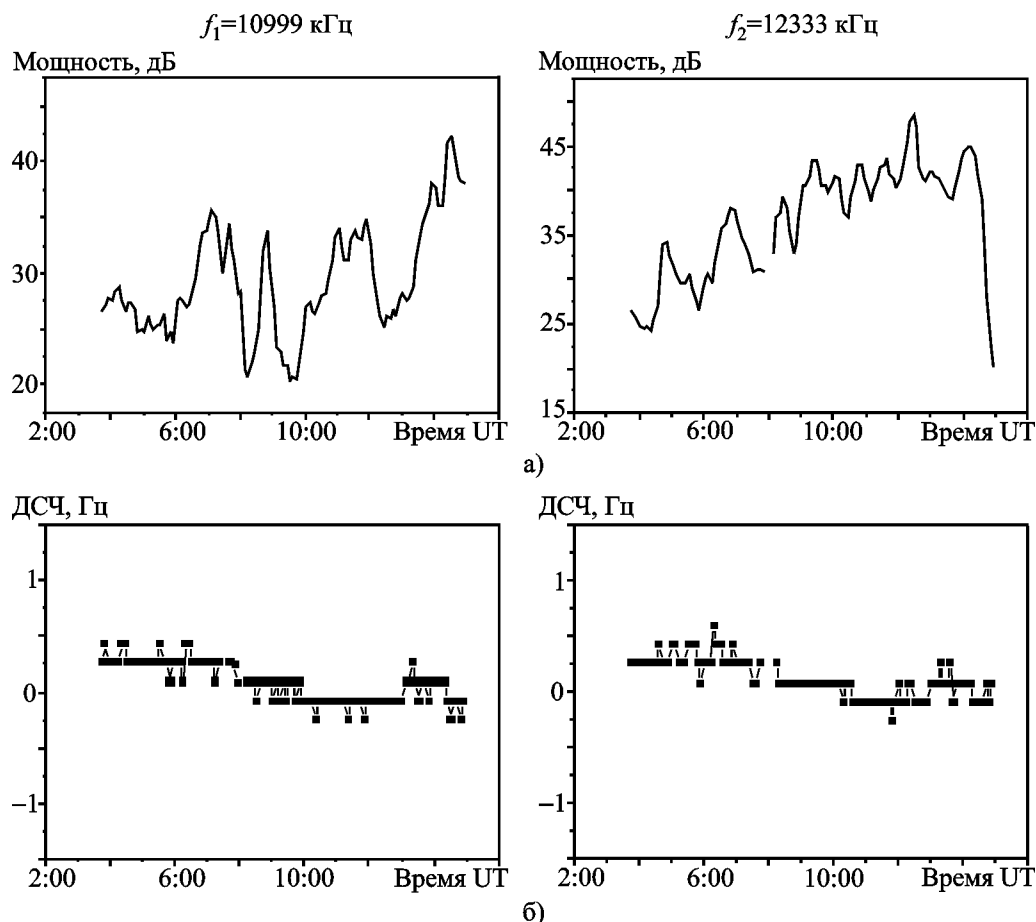
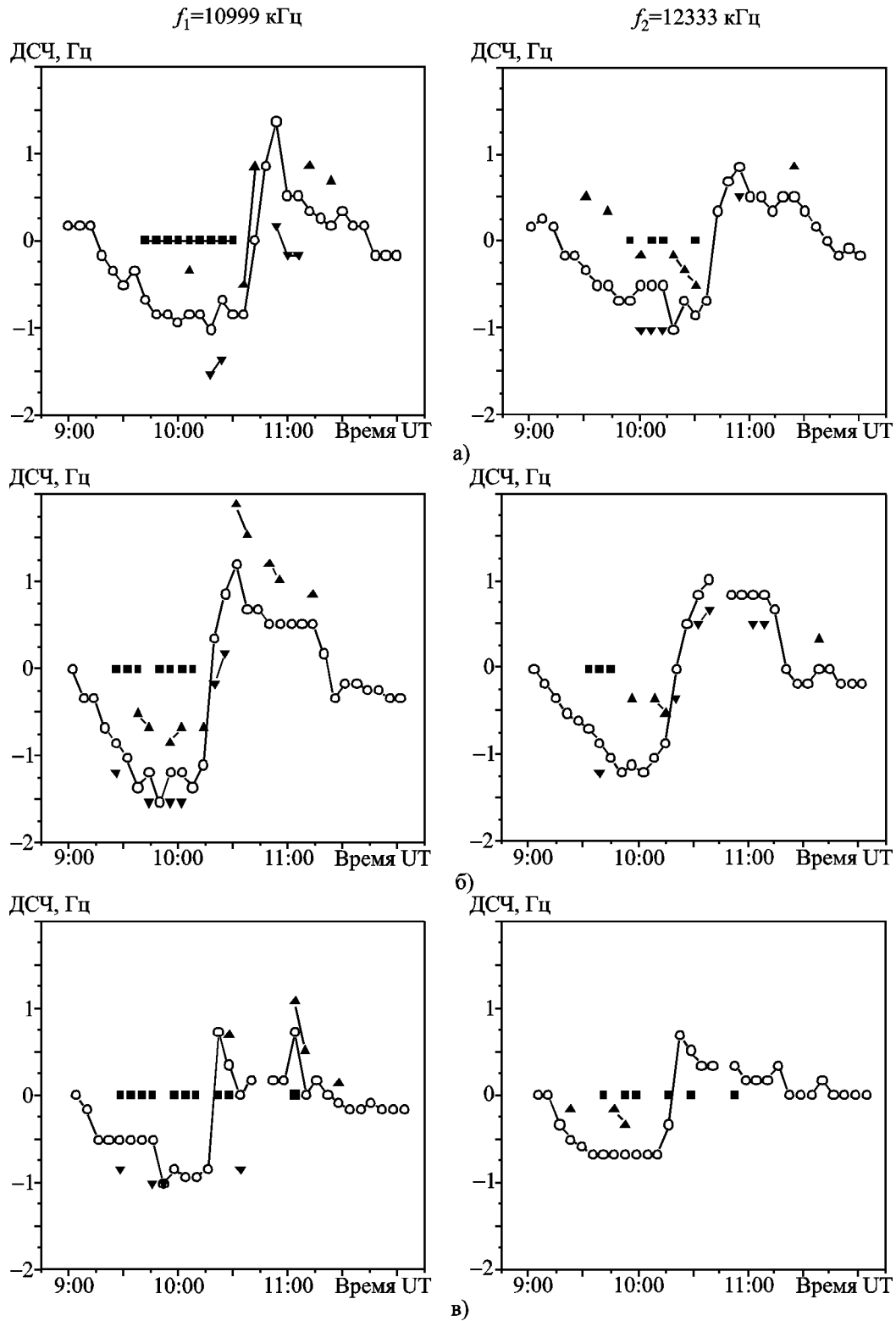


Рис. 2. Зависимость мощности (а) и ДСЧ (б) сигналов от времени на трассе Магадан – РАО 2 августа 2008 г.

дневных значений. Примерно с 8:00 UT частотные сдвиги не превышали спектрального разрешения, применяемого при обработке ( $\pm 0.17$  Гц), что соответствовало незначительным изменениям электронной концентрации и/или высоты отражающего слоя. Зависимости аналогичного типа получены 31 июля и 2 августа и для двух других трасс.

Существенным образом отличались частотные характеристики во время СЗ. На рис. 3, а-в показаны зависимости частоты максимумов спектров пробных сигналов от времени на двух частотах, полученные 1 августа на трассах Иркутск – РАО, Магадан – РАО и Норильск – РАО соответственно. Кривые, на которых результаты измерений обозначены кружками, соответствуют вариациям частоты основных спектральных максимумов сигналов. На графиках хорошо видны общие для всех трасс и частот

закономерности. Первоначально наблюдалось смещение максимумов в отрицательную область, продолжительность этого участка составляла  $1.25 \div 1.5$  ч. Далее происходил довольно быстрый переход длительностью  $6 \div 30$  мин от максимально отрицательных к максимально положительным значениям смещения. Моменты перехода ДСЧ через ноль для всех трасс и частот, определенные из экспериментальных кривых рис. 3 графическим методом, приведены в таблице. В ней для сравнения приведено также время пересечения центром лунной тени проекции трассы распространения сигнала на поверхности Земли (0 км) и на ионосферных высотах (250 км). Данные для расчета взяты из [5]. Из таблицы видно весьма точное совпадение моментов перехода ДСЧ через ноль со временем максимальной фазы затмения над трассой. Этот факт может свидетельствовать о пре-



**Рис. 3.** Флуктуации частот спектральных максимумов сигналов на трассах Иркутск – РАО (а), Магадан – РАО (б), Норильск – РАО (в) во время затмения: –○– – частота энергонесущего максимума; –■– – частота стабильного максимума; –▲– – частота положительного максимума; –▼– – частота отрицательного максимума

**Таблица.** Момент прохождения ДСЧ сигналов через ноль

Частота, кГц	Трасса		
	Иркутск – РАО	Магадан – РАО	Норильск – РАО
10999	10:42:50	10:18:40	10:19:30
12333	10:41:50	10:21:00	10:19:40
Пересечение трассы центром лунной тени			
На высоте 0 км	10:40:25	10:19:45	10:18:20
На высоте 250 км	10:39:00	10:18:50	10:17:30

имущественном влиянии нижней ионосферы на сдвиг частоты сигналов, так как время реакции слоя E ионосферы на прохождение лунной тени составляет единицы минут, в то время как максимальные изменения в слое F могут отставать от максимальной фазы затмения на несколько десятков минут [6]. Некоторые расхождения в экспериментальных результатах на двух частотах на более длинных трассах могли быть обусловлены отличающимися траекториями распространения.

Затем значения ДСЧ снижались до нулевых или небольших отрицательных, продолжительность этого интервала составляла от одного до двух часов. Отрицательная и положительная “фазы” вариаций ДСЧ несимметричны. Это может быть объяснено регулярным суточным ходом плотности ионосферной плазмы и запаздывающей реакцией на СЗ на высотах верхней ионосферы.

На всех трассах девиации на более высокой рабочей частоте были меньше, чем на более низкой. Так, отношение амплитуды флуктуаций ( $F_{\max} - F_{\min}$ ) на частоте сигнала 12333 кГц к аналогичной величине на частоте 10999 кГц составило 0.79, 0.81 и 0.78 для иркутской, магаданской и норильской трасс соответственно. Отметим, что отношение рабочих частот составляет  $10999/12333 = 0.89$ . Таким образом, зависимость ДСЧ сигналов от несущей частоты весьма близка к обратно пропорциональной. Это означает, что доплеровский сдвиг обусловлен изменением коэффициента преломления (электронной плотности) вдоль трассы распространения. Если бы вариации частоты были вызваны изменениями высоты отражающей

области при неизменной электронной концентрации в ней, то зависимость ДСЧ от частоты пробного сигнала должна была быть прямо пропорциональной.

Кроме общих закономерностей, в поведении ДСЧ наблюдались и некоторые отличия. Так, на магаданской трассе время перехода от отрицательных ДСЧ к положительным на частотах 10999 и 12333 кГц отличалось на 12 мин, в то время как на других трассах это время совпадало. По-видимому, этот факт свидетельствовал о значительном отличии траекторий и/или механизмов распространения для разных частот на самой длинной экспериментальной трассе.

Форма временной зависимости ДСЧ на частоте 10999 кГц на норильской трассе имела некоторые особенности. Например, отрицательная “полуволна” характеризовалась участками с постоянным частотным сдвигом. Во время положительной “полуволны” наблюдались два коротких выброса примерно одинаковой амплитуды, разнесенные на 36 мин. Объяснить такое поведение разными временами пересечения лунной тенью трассы распространения на разных участках не представляется возможным, так как радиолиния практически перпендикулярна к траектории движения лунной тени по Земле. Возможно, в эти моменты времени происходили переходы от одного механизма распространения к другому, например, от односкачкового к двухскачковому, или наоборот.

Из рис. 3 видно, что во время затмения одновременно наблюдалось до 3-х дополнительных максимумов, амплитуда которых составляла  $0.15 \div 1$  от величины основного пика.

Дополнительные максимумы в спектре принятых сигналов могли соответствовать разным магнитоионным компонентам или более сложным траекториям распространения. Максимум с нулевым ДСЧ присутствовал в сигналах на всех пробных трассах. Он соответствовал распространению в некой неподвижной в пространстве и/или неизменной во времени области, наличие которой в зоне затмения достаточно сложно себе представить. Возможно, он обусловлен прохождением сигнала не по дуге большого круга, а в стороне от области полного затмения с сильными боковыми отклонениями. Вероятность наблюдений этого максимума уменьшалась с ростом рабочей частоты и увеличением длины трассы.

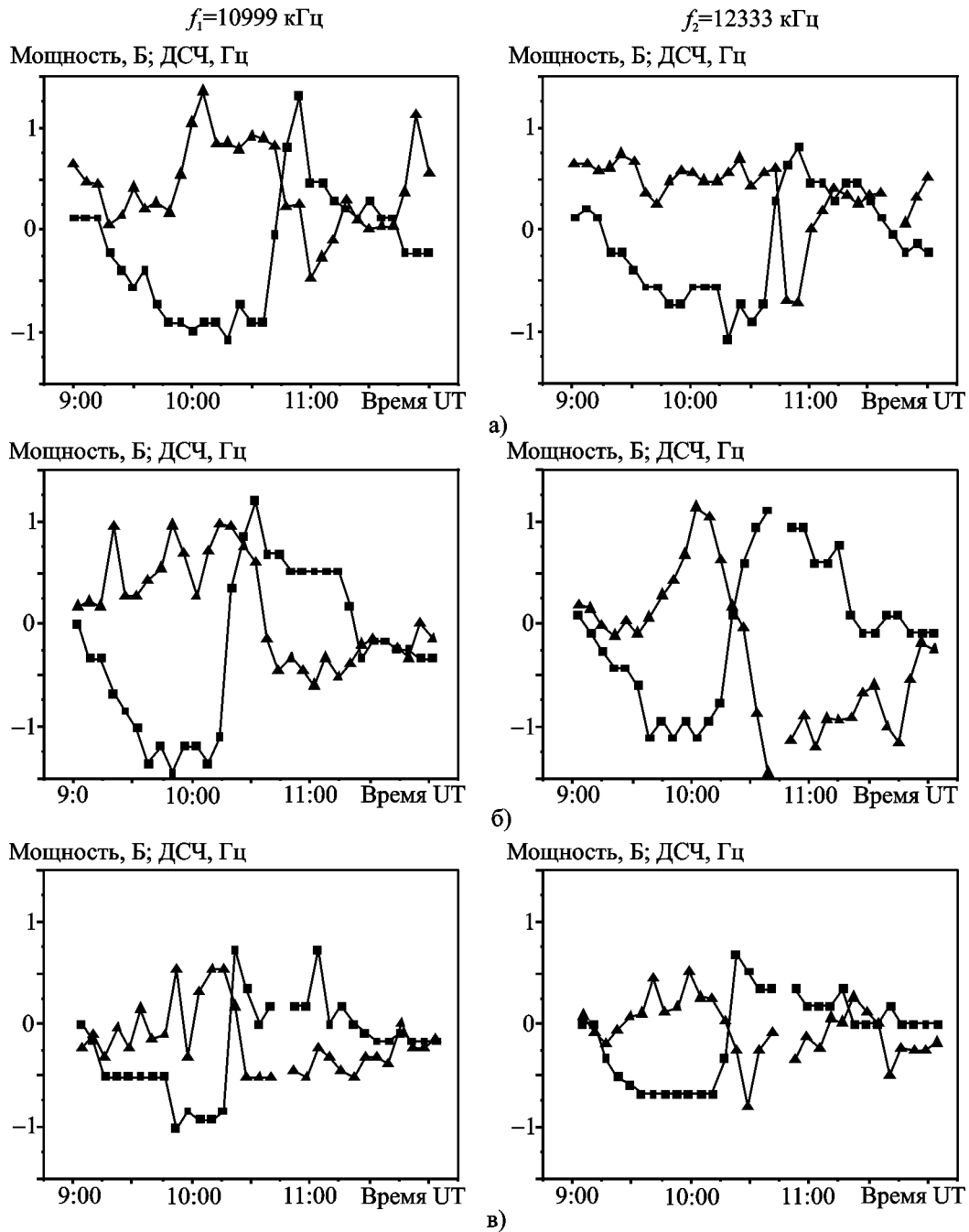
Подробный анализ временных зависимостей мощностей сигналов, принятых 1 августа, позволил выделить одну характерную особенность, которая состояла в резком уменьшении мощности во время максимальной фазы затмения над трассой, после которого следовал немонотонный рост. На рис. 4 приведены временные зависимости мощности сигналов в логарифмическом масштабе и ДСЧ их основных максимумов. Из рисунка видно, что интервалы уменьшения мощности сигналов практически совпадают с интервалами изменения знака доплеровского сдвига частоты, которое происходило во время максимальной фазы затмения.

Аналогичные особенности поведения частотных характеристик сигналов во время затмения наблюдались и в приемном пункте, расположенном на о. Свалбард. На рис. 5, а, б показаны временные зависимости ДСЧ принятых сигналов во время затмения на трассах Иркутск – Свалбард и Норильск – Свалбард соответственно. Результаты измерений на трассе Магадан – Свалбард не приведены, так как устойчивый прием сигналов в приемном пункте практически отсутствовал. Так же как и в РАО, ДСЧ состоял из положительной и отрицательной “полуволн”, однако их форма несколько иная, а общая продолжительность больше. На Свалбарде наблюдался и более длинный интервал перехода от максимально отрицательных к максимально положительным значениям смещения. На частоте 10999 кГц, для которой удалось получить достоверные данные, он составлял порядка часа. Момент равенства

доплеровской частоты нулю на трассе Иркутск – Свалбард на частоте 10999 кГц был зафиксирован в 10:10, а на частоте 12333 кГц – в 10:18 UT. Таким образом, переход через ноль на этой трассе для разных частот весьма заметно отличался. Время перехода через ноль ДСЧ на трассе Норильск – Свалбард определить не удалось, так как этот переход сопровождался падением мощности сигналов ниже уровня шумов, что совпадало с поведением принятых сигналов и на РАО (см. рис. 4).

#### 4. Моделирование вариаций ДСЧ во время затмения

Известно, что электронная концентрация нижней ионосферы хорошо контролируется зенитным углом Солнца, т. е. пропорциональна освещенности [7]. Концентрация электронов в верхней ионосфере имеет достаточно сложную зависимость от времени суток, реагируя на изменение освещенности с некоторым запаздыванием, а в летние месяцы может иметь максимум, существенно несовпадающий с моментом нахождения Солнца в зените [8]. В то же время экспериментальные исследования ионосферы во время СЗ методом вертикального зондирования показали, что критическая частота слоя F, хотя и с некоторой задержкой во времени, заметно реагировала на прохождение лунной тени (см., например, [3, 6]). Радиопрозрачные слои, на которых были проведены описанные выше эксперименты, имели в основном долготную ориентацию и поэтому характеризовались наличием значительных продольных градиентов ионосферных параметров вдоль трасс. Это, в свою очередь, могло способствовать возникновению нескольких модов, распространяющихся различным числом скачков с отражениями от одного или разных слоев ионосферы. Оценки показали, что, например, на трассе Иркутск – РАО могли параллельно существовать моды 2F, 3E, 4E, 1E+1F. Кроме того, экспериментальные данные, описанные выше, свидетельствуют, что нижняя ионосфера играла значительную роль в формировании характеристик сигналов. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что ДСЧ сигналов могут зависеть не только от процессов в ионо-



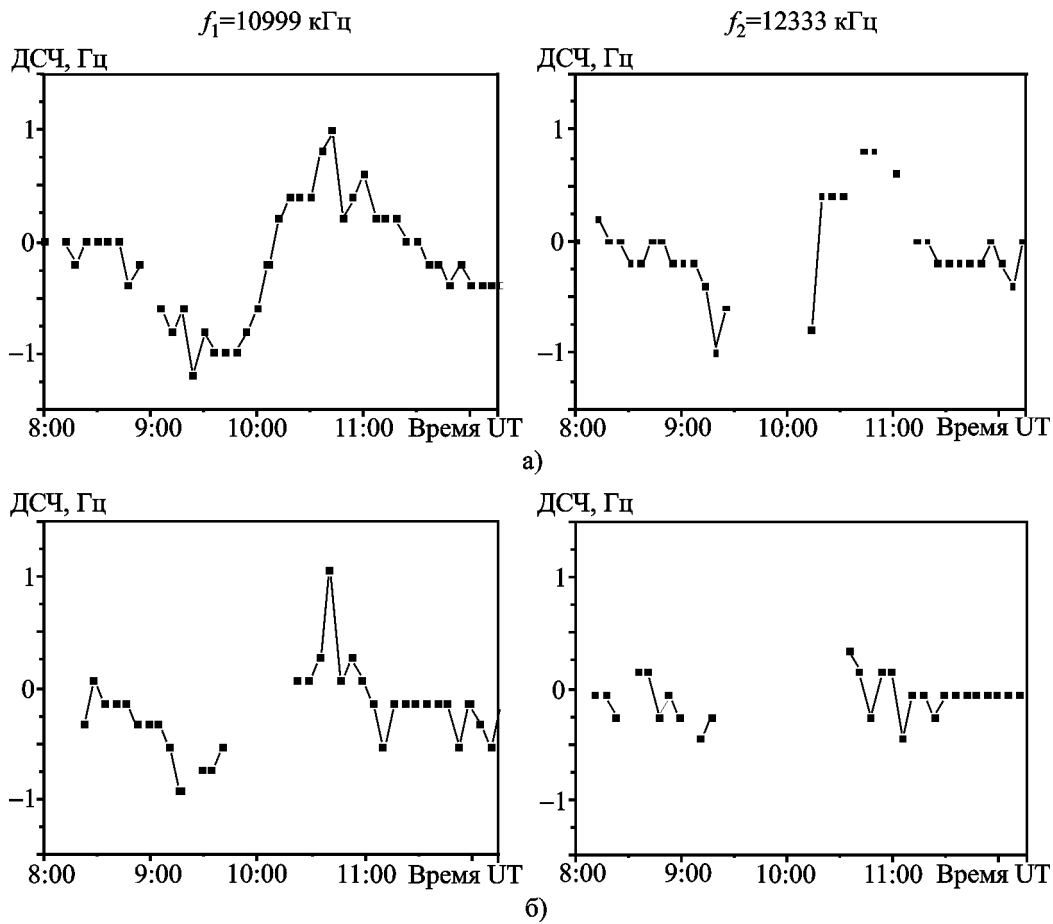
**Рис. 4.** Флуктуации мощности (—▲—) и частоты (—■—) сигналов на трассах Иркутск – РАО (а), Магадан – РАО (б), Норильск – РАО (в) во время затмения

сфере, вызванных изменением освещенности вблизи точки отражения, а и от вариаций ионосферы вдоль всей трассы. В рамках такого предположения задача моделирования свелась к поиску величины

$$\tilde{f}_D = K(f) \frac{d}{dt} I_\Sigma, \quad (1)$$

где  $\tilde{f}_D$  – модельное значение ДСЧ,  $\frac{d}{dt} I_\Sigma$  – производная по времени от интегральной ос-





**Рис. 5.** Флуктуации частоты спектрального максимума сигналов на трассах Иркутск – Свалбард (а) и Норильск – Свалбард (б) во время затмения

вещности трассы,  $K(f)$  – частотно зависимый коэффициент пропорциональности между производной освещенности и ДСЧ.

#### 4.1. Схема расчета относительной интегральной освещенности

Для оценки интегральной освещенности во время затмения вдоль радиотрассы рассчитывались относительное перекрытие дисков Солнца и Луны, относительная площадь открытой части Солнца, а также зенитный угол Солнца. В качестве исходных данных для расчета были взяты таблицы координат положения центра лунной тени на поверхности Земли, приведенные в [5], т. е. координаты точек, в которых совпадают направления на центр Солнца и Луны. Исходя из этой информации был сделан расчет смещения диска Луны относительно диска Солнца для разных точек трассы.

На первом этапе рассчитывались координаты проекции пробной трассы на поверхность Земли в предположении, что распространение происходило вдоль дуги большого круга. Для каждой трассы расчет велся по 100 точкам, для которых были вычислены разностные векторы  $d\vec{T}$  между позиционным вектором центра лунной тени  $\vec{S}$  (вектором, направленным из центра Земли в центр лунной тени на ее поверхности) и вектором трассы  $\vec{T}$  (вектором, направленным из центра Земли к текущей точке на трассе, см. рис. 6, а):

$$d\vec{T} = \vec{S} - \vec{T}$$

Затем вычислялись расстояния  $D$  между точками вдоль трассы и лучом, проходящем из центра Солнца через центр тени:

$$D = |[\vec{dT} \times \vec{V}]|,$$

где  $\vec{V}$  – единичный вектор-направление на Солнце; для его нахождения были определены склонение Солнца и долгота подсолнечной точки для каждого момента времени проведения эксперимента.

Следующие операции позволили рассчитать коэффициент перекрытия диаметра диска Солнца для каждой точки трассы. Смещение диска Луны при сдвиге наблюдателя относительно центра тени можно выразить в следующем виде:

$$d\varphi_M = D/D_M,$$

где  $D_M$  – расстояние до Луны, взятое равным 384400 км для всех точек всех трасс. Смещение диска Солнца  $d\varphi_S = D/D_S$  (здесь  $D_S$  – расстояние до Солнца, равное 150 млн км), которое много меньше смещения диска Луны (в  $D_S/D_M \approx 390$  раз), в расчетах не учитывалось.

Относительная открытая часть диаметра Солнца равна

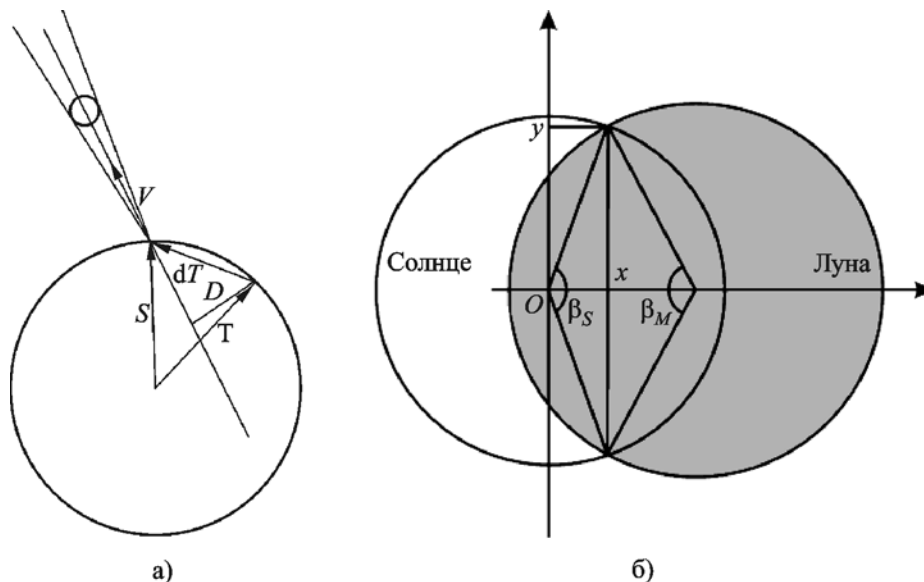
$$\delta_+ = \frac{d\varphi_M - (R_M - R_S)}{2R_S},$$

где  $R_M$  – угловой радиус Луны, равный 0.004584 рад (15'45.5");  $R_S$  – угловой радиус Солнца, равный 0.004141 рад (14'14.12").

На следующем этапе определялась относительная светящаяся площадь диска Солнца, для чего рассчитывались площади соответствующих затемненных сегментов на дисках Солнца и Луны (рис. 6, б). При этом предполагалось, что центр диска Солнца находится в начале координат, а центр диска Луны на оси  $Ox$  в точке с координатами  $R_S + R_M - dr$  (где  $dr = 2R_S\delta_-$  – перекрытие диаметра диска Солнца в угловых единицах). Это позволило определить координаты точек пересечения дисков:

$$X = \frac{(R_S + R_M - dr)^2 - R_M^2 + R_S^2}{2(R_S + R_M - dr)},$$

$$Y = \sqrt{R_S^2 - X^2}.$$



**Рис. 6.** Схема расчета удельной освещенности трассы (а); схема расчета светящейся части диска Солнца (б)

Полная площадь закрытой части Солнца  $C$  в угловых единицах равна сумме площадей двух сегментов (одного на диске Солнца –  $C_S$ , второго на диске Луны –  $C_M$ )

$$C = C_S + C_M,$$

где  $C_M = \frac{\beta_M R_M^2}{2} - Y(R_S + R_M - dr - X)$ ,  
 $C_S = \frac{\beta_S R_S^2}{2} - XY$ , а углы выражены формулами:

$$\begin{cases} \beta_S = 2\arctg(Y/X), & X > 0, \\ \beta_S = 2\pi + 2\arctg(Y/X), & X < 0, \end{cases}$$

$$\beta_M = 2\arctg\left(\frac{Y}{R_S + R_M - dr - X}\right).$$

Таким образом, относительная открытая площадь Солнца  $I_S$  определялась как

$$I_S = \frac{\pi R_S^2 - C}{\pi R_S^2}.$$

Зенитный угол Солнца рассчитывался следующим образом:

$$Z_S = \arccos\left(\frac{\vec{VT}}{|\vec{T}|}\right).$$

Окончательно относительная интегральная освещенность трассы  $T_i$  рассчитывалась по формуле:

$$I_\Sigma = \int_{T_i} I_S \cos Z_S dl,$$

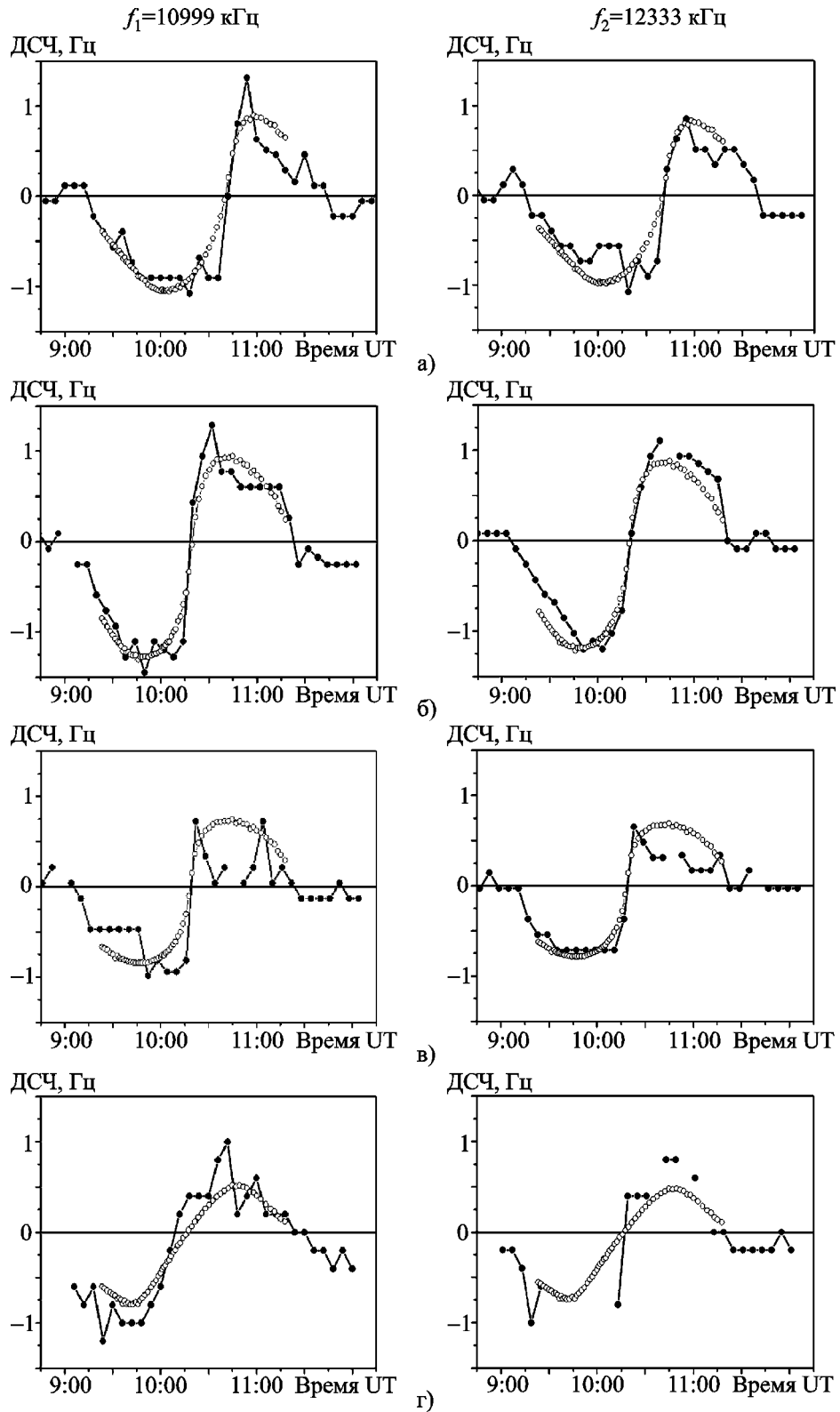
где  $l$  – координаты точек трассы  $T_i$  на поверхности Земли.

На завершающем этапе определялись скорость изменения интегральной освещенности на трассе и оценка модельного ДСЧ (1). Значения коэффициента  $K(f)$  были найдены путем вписывания модельной кривой в экспериментальные зависимости ДСЧ на трассе Магадан – РАО (на которой наблюдалось наи-

лучшее соответствие форм экспериментальной и модельной зависимостей) по критерию минимума суммы квадратов отклонений. Они составили  $4.3 \cdot 10^{-4}$  км<sup>-1</sup> для частоты 10999 кГц и  $4.0 \cdot 10^{-4}$  км<sup>-1</sup> для частоты 12333 кГц. Отношение для двух частот равнялось 0.93, что достаточно близко к обратно пропорциональной зависимости.

#### 4.2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Вариации экспериментальных и рассчитанных значений ДСЧ приведены на рис. 7, а-г для трасс Иркутск – РАО, Магадан – РАО, Норильск – РАО и Иркутск – Свалбард соответственно. Из их сравнения видно, что результаты моделирования достаточно хорошо совпадают с измеренными значениями ДСЧ. Экспериментальный и модельный размахи вариаций ДСЧ сигналов, принятых на РАО, максимальны на трассе Магадан – РАО и минимальны на трассе Норильск – РАО. В эксперименте это объясняется тем, что норильская трасса практически являлась частью магаданской. При этом во время затмения к смещению частоты на норильской трассе добавлялось смещение на магаданской. При моделировании большему размаху ДСЧ на магаданской трассе соответствует больший диапазон изменения освещенности. Скорость изменения ДСЧ от отрицательных к положительным значениям на трассе Иркутск – Свалбард существенно меньше тех, что наблюдались на трассах, приемным пунктом которых являлась РАО. Этот эффект связан с тем, что трассы с приемным пунктом в РАО ориентированы преимущественно перпендикулярно к направлению движения лунной тени (рис. 1), соответственно вдоль всей трассы фазы нарастания и убывания затмения совпадали во времени, и переход от убывания к нарастанию интегральной освещенности происходил значительно быстрее. Что касается радиотрассы Иркутск – Свалбард, то солнечная тень двигалась под небольшим углом к ней. Это приводило к тому, что на одной части трассы освещенность убывала, в то время как на другой – возрастала, поэтому изменение суммарной освещенности всей радиолинии происходило медленнее, чем на “поперечных” трассах, также медленнее происходил переход производной интегральной освещеннос-



**Рис. 7.** Сравнение результатов измерений и моделирования ДСЧ на разных трассах: а) – Иркутск – РАО, б) – Магадан – РАО; в) – Норильск – РАО; г) – Иркутск – Свалбард

ти через ноль. Следует отметить, что сдвига моментов времени перехода ДСЧ через ноль между экспериментальными и модельными зависимостями практически не наблюдалось. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что сдвиги частоты во время измерений определялись в значительной степени процессами в нижней ионосфере.

Отметим, что наибольшее подобие экспериментальных и расчетных кривых отмечается для самой длинной радиотрассы Магадан – РАО, наихудшее – для трассы Норильск – РАО. Действительно, чем длиннее трасса, тем большее число модов участвует в формировании сигнала в точке приема. При этом становится более обоснованным описание трассы интегральными параметрами, так как каждый из модов сигнала взаимодействует с ионосферой в пространственно разнесенных точках. На относительно короткой трассе Норильск – Иркутск сигнал в точке приема формирует меньшее число модов, затмение по-разному влияет на их параметры, а изрезанность вариаций ДСЧ, возможно, связана с его оценками по разным модам, параметры которых определяются локальными эффектами на разных участках радиотрассы.

## 5. Выводы

Разработана методика и проведены измерения спектральных характеристик пробных сигналов во время СЗ 1 августа 2008 г. на трассах различной протяженности и ориентации на двух рабочих частотах. Во всех случаях обнаружены существенные вариации частоты сигналов.

Показано, что изменения ДСЧ сигналов во время затмения на всех трассах имеют общие закономерности. Сдвиг частоты близок к нулю и имеет наибольшую скорость изменения в момент максимальной затененности всей радиолинии.

Обнаружено, что ДСЧ сигналов обратно пропорционально рабочей частоте. Это означает, что преобладающим механизмом его формирования во время затмения являлось изменение коэффициента преломления вдоль трассы.

Проведено моделирование скорости изменения интегральной освещенности радиотрасс во время СЗ. Показано, что вариации этой величины качественно совпадают с вариациями

ДСЧ сигналов, что подтверждает гипотезу о значительной роли нижней ионосферы в изменении частотных характеристик сигналов во время затмения.

В заключение авторы считают своим долгом отметить, что представленные исследования проведены в рамках НИР “Антипод”, которая поддержана специальным совместным грантом НАН Украины и СО РАН (Постановление Президиума НАН Украины № 160 от 21.03.2006 г.), и интеграционного проекта СО РАН №15 “Диагностика динамических процессов в среднеширотной и субполярной атмосфере”. Измерения на о. Свалбард проведены в рамках проекта НАН Украины “Шпицберген”.

## Литература

1. Кашеев С. Б., Колосков А. В., Зализовский А. В., Галушко В. Г., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. И., Петько П. В. Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, №1. – С. 12-25.
2. Зализовский А. В., Галушко В. Г., Кашеев А. С., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М., Егоров И. Б., Попов А. В. Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах // Геомагнетизм и аэрономия. – Т. 47, №5. – 2007. – С. 674-684.
3. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P., Vodyannikov V. V., Gordienko G. I., Litvinov Yu. G., Yakovets A. F. Ionospheric Effects of the March 29, 2006, Solar Eclipse over Kazakhstan // Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – Vol. 47, No. 4. – P. 461-469.
4. Пикулик И. И., Кашеев С. Б., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Приемный КВ комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде // Украинский антарктический журнал. – 2003. – №1. – С. 61-69.
5. F. Espenak and J. Anderson. Total Solar Eclipse of 2008 August 01 // NASA/TP-2007-214149.
6. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е., Терещенко В. Д., Черняков С. М., Терещенко В. А. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Н. Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, №1. – С. 103-108.
7. K. Davies. Ionospheric Radio. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. – 580 p.
8. Месячный прогноз максимально применимых частот. Август 2008. – Москва: Гидрометеоздат, 2008. – 48 с.

**Варіації частоти КХ сигналів на довгих трасах під час сонячного затемнення**

**С. Б. Кашеев, А. В. Залізовський,  
О. В. Колосков, В. Г. Галушко,  
І. І. Пікулик, Ю. М. Ямпольський,  
В. І. Куркін, Г. І. Литовкін, О. І. Орлов**

Проаналізовано результати вимірів спектральних характеристик сигналів КХ діапазону на довгих радіолініях під час сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. та у суміжні дні. У якості джерел випромінювання використано спеціальні передавачі, розташовані поблизу Іркутська, Норильська та Магадану. Приймальні пункти були організовані коло Харкова та на острові Свалбард (архіпелаг Шпицберген, Норвегія). Виявлено, що доплерівський зсув сигналу під час затемнення має аналогічні особливості на різних трасах, а його амплітуда приблизно обернено пропорційна до робочої частоти. Розроблено феноменологічну модель часової залежності доплерівського зсуву сигналу від зміни інтегрального освітлення всієї радіолінії. Результати моделювання якісно добре співпадають з результатами експериментальних вимірів.

**Frequency Variations of HF Signals at Long-Range Radio Paths during a Solar Eclipse**

**S. B. Kascheev, A. V. Zalizovski,  
A. V. Koloskov, V. G. Galushko,  
I. I. Pikulik, Y. M. Yampolski, V. I. Kurkin,  
G. I. Litovkin, and A. I. Orlov**

The measured spectral characteristics of HF signals at long-range propagation paths are analyzed for the day of the solar eclipse of August 1, 2008 and for the two adjacent days. The signals were radiated by special transmitters near Irkutsk, Norilsk and Magadan. The receiving sites were equipped near Kharkiv (Ukraine) and on the Svalbard Island (Spitsbergen Archipelago, Norway). The Doppler frequency shift variations during the solar eclipse have been found to show a similar behavior at different radio paths, with the characteristic amplitude being inversely proportional to the carrier frequency. A phenomenological model is suggested for the Doppler frequency shift variations in dependence on time varying integral illumination of the propagation paths. The model results are in good qualitative agreement with the measurements.