

УДК 550.383

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИПСА ПОЛЯРИЗАЦИИ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЯХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ОБСЕРВАТОРИЯХ “БАРЕНЦБУРГ” И “ЛОВОЗЕРО”

© 2012 г. В. К. Ролдугин, А. Н. Васильев

Учреждение РАН Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты (Мурманская обл.)

e-mail: rold_val@pgia.ru

Поступила в редакцию 22.06.2010 г.

После доработки 04.10.2010 г.

Исследованы суточные вариации амплитуды и параметров эллипса поляризации первого шумановского резонанса по результатам наблюдений трех магнитных компонент поля в период 1–10 декабря 2007 г в обсерваториях “Баренцбург” и “Ловозеро”. Эллипсы строились в двух плоскостях (H, D) и (H, Z), оценены величина малой оси, наклон большой оси, эллиптичность и направление вращения. Магнитная вертикальная составляющая шумановского резонанса в три–четыре раза меньше горизонтальной. Обнаружена разница в суточных вариациях параметров эллипсов на обеих обсерваториях. Эффект может быть вызван разницей проводимости земли в окрестностях обсерваторий и ее анизотропией. Наклон большой оси и эллиптичность имеют полусуточные составляющие. Вектор поляризации вращается на обеих станциях в горизонтальной плоскости преимущественно от D к H , а в вертикальной – от Z к H .

1. ВВЕДЕНИЕ

В диапазоне крайне низких частот (КНЧ), от 1 мГц до 100 Гц, находятся естественные излучения: иррегулярные геомагнитные пульсации Pi 1–3, регулярные Pc 1–5, альвеновский резонанс, а также шумановский резонанс. Если первые три явления генерируются в магнитосфере и имеют максимальную амплитуду вблизи овала полярных сияний, то шумановский резонанс (ШР) возникает, по мнению большинства исследователей, в полости земля-ионосфера под действием молниевых разрядов и имеет глобальный характер. Первая частота ШР равна ~ 7.8 Гц.

Наземные измерения КНЧ-излучений проводятся, как правило, лишь в горизонтальных магнитных компонентах; для ШР иногда регистрируется и вертикальная электрическая составляющая. В модели идеальной проводимости земли вертикальной магнитной и горизонтальной электрической компонент быть не должно. Однако они есть, и связано это с конечной проводимостью земли.

Следствием конечной проводимости земли может быть не только появление вертикальной магнитной компоненты, но и изменение горизонтальных. Конфигурация измеряемого на земле поля должна зависеть не только от токов в ионосфере и магнитосфере, но и от проводимости земли в окрестности наблюдений. Влияние проводимости будет сказываться прежде всего на поляризации регистрируемого сигнала. Есть несколько исследований, посвященных влиянию

проводимости земли на поведение геомагнитных пульсаций Pc , но для ШР изучение поляризации проводилось лишь для горизонтальных компонент.

Holtman and McAskil [1988] сравнили сигналы ШР в горизонтальной плоскости на полярных станциях, разнесенных на 1100 км и расположенных у моря, и выявили весьма высокую когерентность сигналов обоих пунктов. Также оказалось, что величина когерентности не зависит ни от Kp , ни от появления SC или солнечной вспышки. Причина, видимо, кроется в специфике сигнала ШР как волны. Хотя ШР есть глобальное явление, однако его частоты по ортогональным направлениям различаются, см. Sentman [1987] и Roldugin et al., [2004b]. Поэтому поляризация должна иметь достаточно сложный характер. Она была исследована в работе [Sentman, 1987] для горизонтальных компонент на низкоширотной обсерватории Table Mountain, Калифорния, и оказалось, что поляризация эллиптическая, величина эллиптичности сильно изменяется, но в основном больше 0.5, направление вращения днем правое, а ночью левое.

По результатам исследования Русакова и Бакстова [1988] на среднеширотной обс. “Борок” для первого резонанса вращение преимущественно левое; величина эллиптичности составляет 0.25. Авторы указывают на важность определения направления вращения для решения вопроса об источнике энергии ШР: некоторые исследователи (Блиох и др., [1977]; Богородский и др., [1982] и др.) считают возможным возбуждение ШР, помимо молниевых разрядов, процессами в магни-

тосфере и ионосфере, и в таком случае вращение поляризации было бы правым. Русаков и Бакстов [1988], как и Sentman [1987; 1989], связывают направление вращения с проблемой расщепления ШР: предполагается, что широкая первая полоса резонанса в действительности представляет триплет, боковые гармоники которого вращаются в разные стороны. В таком случае и частота, и поляризация должны зависеть от места наблюдения.

Bosinger and Shalimov [2004] нашли, что на о-ве Крит, где $L = 1.3$, в ночные часы поляризация ШР близка к линейной, а в дневные наблюдается левое вращение и эллиптичность не превышает 0.25.

Изучение вертикальной компоненты ШР началось, видимо, с сообщений об измерениях всех трех его компонент в море на глубине 50 м в военно-морской школе в Monterey, США. В магистерской диссертации McDevitt and Homan [1980] сообщается, что вертикальную компоненту они измерить не смогли при чувствительности прибора $1 : 10^{-6}$ нТл²/Гц на частоте 10 Гц. На следующий год Ames and Vehslage [1981] измерили ее и получили 6.3×10^{-7} нТл²/Гц на 20 Гц при величине горизонтальной компоненты 8×10^{-8} нТл²/Гц на той же частоте.

Об измерениях вертикальной компоненты ШР на Камчатке сотрудниками ИФЗ сообщалось в работе [Roldugin et al., 2004a]. Тесно связанная с вертикальной магнитной компонентой горизонтальная электрическая составляющая ШР изучалась в работе [Roldugin et al., 2006].

Наличие вертикальной компоненты и особенности поляризации ШР даже только в горизонтальной плоскости взаимосвязаны и вызываются проводимостью вблизи пункта наблюдения, но эта тема практически не исследовалась. Целью настоящей работы является восполнить этот пробел по данным высокоширотных станций, находящихся в разных геологических условиях.

2. АППАРАТУРА

Регистрации естественных электромагнитных излучений в КНЧ-диапазоне частот в Полярном геофизическом институте проводятся на obs. Ловозеро (LOZ, $\varphi = 67^{\circ}58' N$, $\lambda = 35^{\circ}01' E$, $\Phi = 64.2^{\circ}$, $\Lambda = 114.6^{\circ}$) с в obs. Баренцбург (BAВ, $\varphi = 78^{\circ}06' N$, $\lambda = 14^{\circ}12' E$, $\Phi = 75.4^{\circ}$, $\Lambda = 110.1^{\circ}$) с 2001 г. В настоящее время в obs. Ловозеро измеряются следующие составляющие: две горизонтальные и вертикальная магнитные компоненты, и две горизонтальные электрические, в obs. Баренцбург — три магнитные компоненты. Горизонтальные магнитные антенны в обеих обсерваториях ориентированы по магнитным меридиану и параллели. Все усилители в полосе частот 0.1–20 Гц подключены к системе сбора круглосуточного наблюдения за поведением низкочастотных излучений естественного происхождения. Частота оцифровки данных 40 Гц, или через 0.025 с.

Каждая магнитно-индукционная антенна имеет ферритовый стержень диаметром 45 мм и длиной 600 мм. Поверх стержня расположены 10 секций катушек, в которые уложены 210000 витков провода. Вдоль антенны расположена также калибровочная катушка. Антенна имеет предусилитель с коэффициентом усиления порядка 400, с которого сигналы поступают по кабелю в приемник, расположенный в помещении. Полосовой фильтр 4-го порядка каждого канала имеет регулируемые частоты среза, снизу — 0.1; 0.5; 1.0 Гц и сверху — 10; 20; 40 Гц, а также возможность изменения усиления до 40 дБ. Приемное устройство содержит калибратор, калибровка осуществляется на частоте 5 Гц. Предусмотрен также ступенчатый (через 10 дБ) аттенюатор с 0 до 60 дБ. Соотношение сигнал/шум при калибровке 0.5 пТл составляет 20 дБ в полосе частот 0.1–20 Гц. Диаграмма направленности антенны соответствует дипольной.

В obs. Ловозеро антенна для регистрации магнитной вертикальной составляющей КНЧ установлена на специальной платформе, снабженной настроечными винтами для юстировки в вертикальном положении.

В obs. Баренцбург антенна находится в вертикальном положении под действием собственного веса в полиэтиленовом герметичном боксе, защищенном от неблагоприятных метеословий.

3. СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ТРЕХ КОМПОНЕНТ ШР

Для 10-ти дней, с 1 по 10 декабря 2007 г., была исследована поляризация магнитного вектора ШР на обеих станциях. Из общего сигнала КНЧ выделялась составляющая ШР при помощи цифровой фильтрации. Амплитудно-частотная характеристика фильтра показана толстой сплошной линией на рис. 1. Полосовой фильтр выделяет частоты в диапазоне от 6.4 до 9.6 Гц. На АЧХ точечной шумообразной кривой наложен типичный амплитудный спектр 5-минутного интервала записи флюксметра в obs. Баренцбург в спокойное время. Узкий пик на частоте 5 Гц — калибровочный сигнал, интенсивный сигнал ниже 1 Гц вызван почти постоянной авроральной активностью в высоких широтах. Фильтр симметричный и фазовых искажений не вызывает.

Типичный пример отфильтрованного сигнала длительностью 5 с в одинаковом масштабе приведен на рис. 2. В верхнем ряду показаны все три компоненты ШР в obs.

Баренцбург, в нижнем — в obs. Ловозеро. Видно, что, строго говоря, шумановский резонанс представляет собой последовательность молниевых цугов длительностью около 0.5–1 с, накладывающихся друг на друга и не синхронных. Характер этих кривых повторяет рис. 3 в работе [Holtman and McAskil, 1988]. В математическом смысле сигнал ШР представляет собой случай-

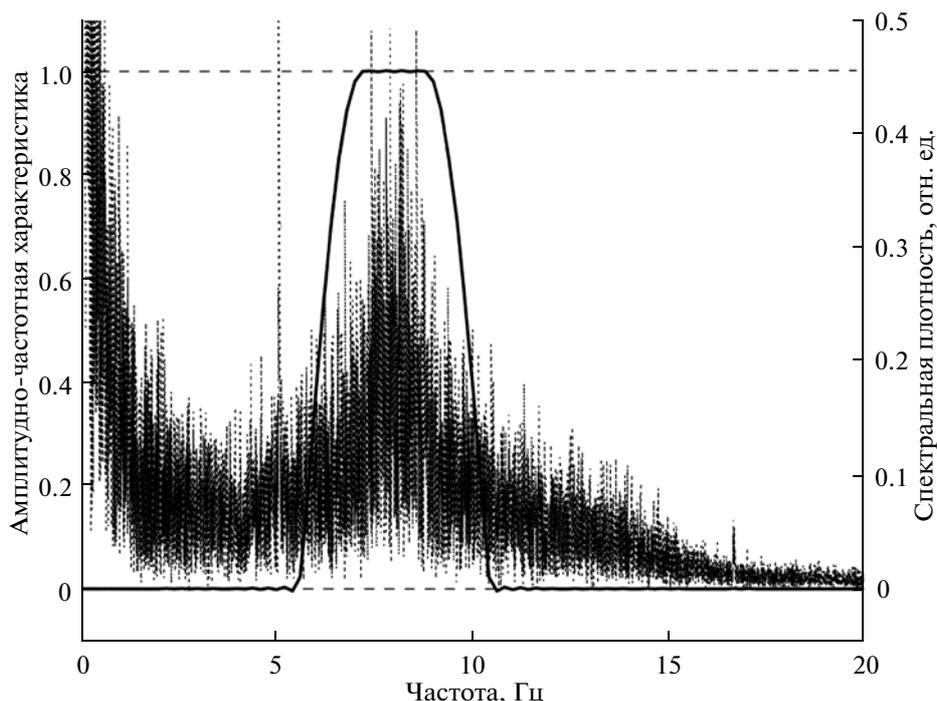


Рис. 1. Типичный амплитудный спектр пятиминутного интервала КНЧ в обс. Баренцбург (прерывистая линия) и амплитудно-частотная характеристика фильтра для выделения ШР (сплошная жирная линия).

ный сигнал. Случайность сигнала ШР хорошо видна и на нашем рис. 1: спектр “резонанса” широкий, амплитуда Фурье-преобразования изменяется от точки к точке достаточно хаотично, что свидетельствует о непостоянстве фазы.

Для каждой компоненты поля значения отфильтрованного сигнала усреднялись по получасовым интервалам, полученные вариации за сутки были затем усреднены по 10-ти дням, и результирующие суточные вариации интенсивности излучений ШР представлены на рис. 3 в одинаковом масштабе. В верхнем ряду показаны изменения интенсивности в обс. Баренцбург, внизу – в обс. Ловозеро. В суточном ходе кривой для D -компоненты хорошо виден африканский максимум грозовой активности около 14:00 UT центр которой располагается в долготном секторе используемых обсерваторий. Максимумы в H -компоненте вблизи 08:00 и 20:00 UT вызваны активностью грозовых центров соответственно в юго-восточный Азии и южной Америке. Эти кривые для обс. Ловозеро близки с ранее полученными в работе [Ролдугин и Белоглазов, 2008] для 10-ти дней начала ноября 2004 г. Все максимумы менее ярко выражены в обс. Баренцбург вследствие ее высокоширотного расположения, где направление прихода волны становится неопределенным. Интенсивность Z -компонент значительно меньше горизонтальных, в обс. Баренцбург суточный ход вертикальной компоненты почти отсутствует, а в обс. Ловозеро в ней просматриваются все три максимума грозовой активности.

4. ЭЛЛИПСЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ШР

Далее оценивались параметры эллипсов поляризации магнитной составляющей ШР. По отфильтрованным данным для всех каналов за каждый из 10-ти дней строились эллипсы поляризации в плоскостях (D, H) и (H, Z) . Для этого массивы разбивались на интервалы длиной 0.25 с, содержащие 10 точек, или 2 периода шумановского резонанса. Данные пар компонент в плоскостях (D, H) и (H, Z) с помощью программы языка *IDL curvefit* аппроксимировались эллипсом с тремя параметрами:

- величина малой полуоси b ,
- угол наклона большой оси α эллипса к оси абсцисс (т.е. к направлению D в горизонтальной плоскости и к H в вертикальной),
- эллиптичность $\varepsilon = b/a$.

Выбрана малая величина интервала, потому что сигнал ШР, как было сказано, периодическим можно принять лишь в пределах интенсивного цуга колебаний, когда его период меняется мало, [Roldugin et al., 2004b], но фаза как видно на рис. 2 непостоянна. Из случаев успешной аппроксимации для дальнейшего рассмотрения принимались только те записи, когда: а) вращение в пределах интервала было только в одну сторону; б) показатель отклонения точек от эллипса по критерию χ -квадрат был меньше единицы и в) оба условия выполнялись для обеих плоскостей. Таких случаев оказывалось немного: в сутки из $86400 \times 4 = 345600$ интервалов в обс. Баренцбурге их набиралось около

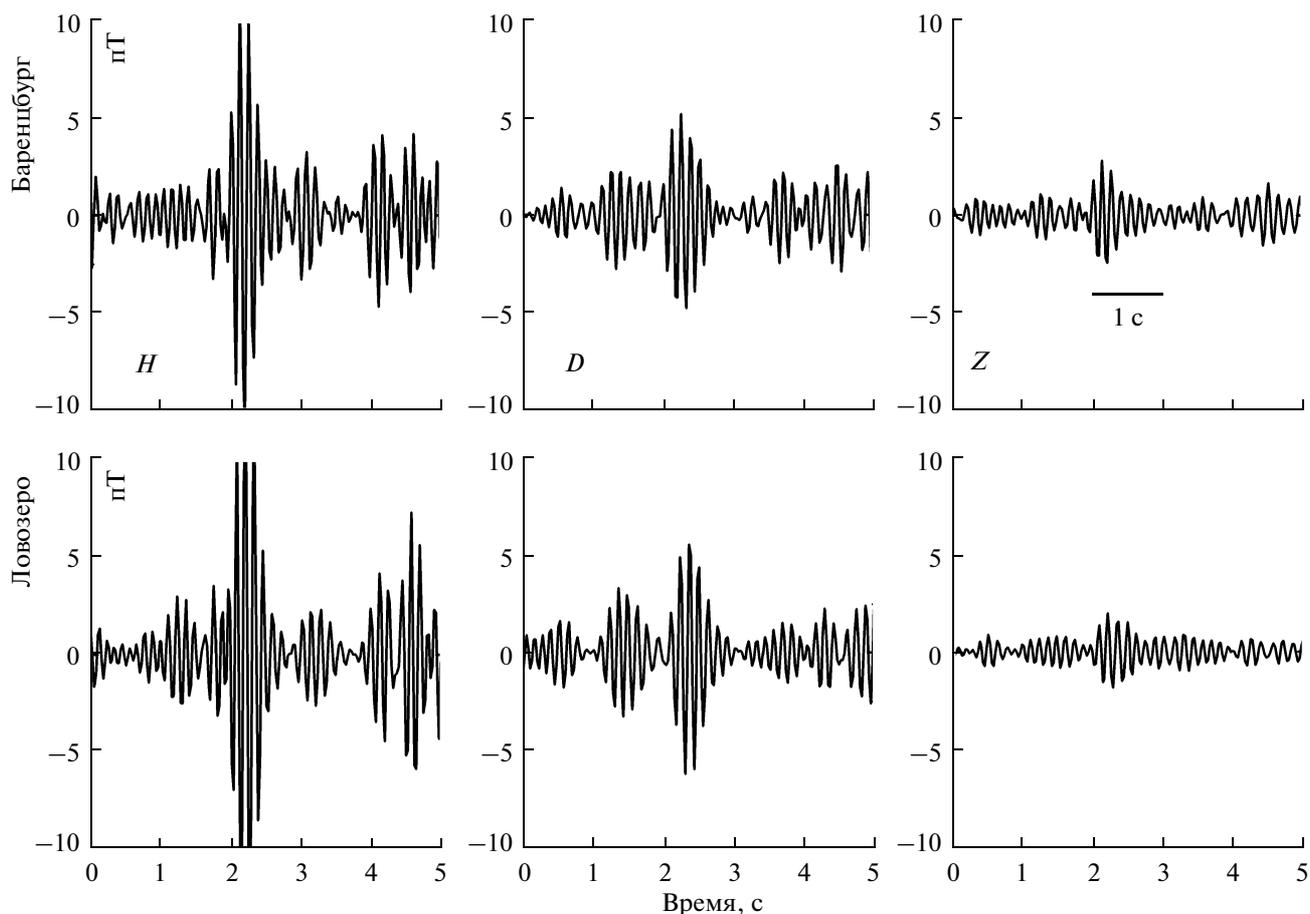


Рис. 2. Пример одновременных пятисекундных кривых интенсивности ШР в трех компонентах в обсерваториях Баренцбург и Ловозеро.

10000–15000, т.е. 3–4%, а в obs. Ловозеро – всего лишь около 2000–2500, или менее 1%.

На рисунке 4 показан пример одной аппроксимации. Наверху приведены эллипсы в obs. Баренцбурге в плоскости (D, H), слева, и (H, Z), справа, а внизу – в obs. Ловозеро за тот же 0.25-секундный интервал. Зачерненным кружком показана первая точка интервала, стрелочками – направление вращения. Видно, что в соответствующих плоскостях направления вращения на станциях совпадают, в горизонтальных плоскостях магнитный вектор перемещается от D к H , а в вертикальных – от Z к H . Наклоны эллипсов заметно различаются в обоих случаях.

Полученные значения параметров эллипсов были усреднены за получасовые интервалы, и их суточные вариации представлены на рис. 5. Слева для obs. Баренцбург и справа для obs. Ловозеро показаны сверху вниз: величины малой полуоси b в пикотеслах, углы наклона a главной оси эллипса к оси абсцисс в градусах и эллиптичности ε . Жирными линиями представлены параметры в горизонтальной плоскости, тонкими сплошными – в вертикальной. Среднеквадратические отклоне-

ния, построенные по 10-суточным кривым, показаны пунктирными линиями.

Величина малой полуоси в горизонтальной плоскости имеет заметную суточную вариацию на обеих станциях с широким максимумом вблизи 14:00 UT, когда наблюдается южноафриканский максимум грозовой активности. Слабовыраженные на рисунке максимумы вблизи 08:00 и 22:00 UT, видимо, связаны с пиками грозовой активности в юго-восточной Азии и южной Америке. Величина полуоси в вертикальной плоскости в два–три раза меньше, чем в горизонтальной, что связано с малой величиной вертикальной составляющей по сравнению с полной горизонтальной составляющей.

Наклон определялся в пределах $\pm 90^\circ$ от соответствующей оси абсцисс. Видна существенная разница в поведении наклонов в обеих обсерваториях. В obs. Баренцбург в обеих плоскостях четко видна полусуточная волна с максимумами в 01:00 и 14:00 UT, но в obs. Ловозеро суточный ход отсутствует. В горизонтальной плоскости в obs. Баренцбург эллипс наклонен в основном к югу примерно на 10° , а в obs. Ловозеро – к северу на 25° . В вертикальной плоскости в obs. Баренцбург эллипс располагается

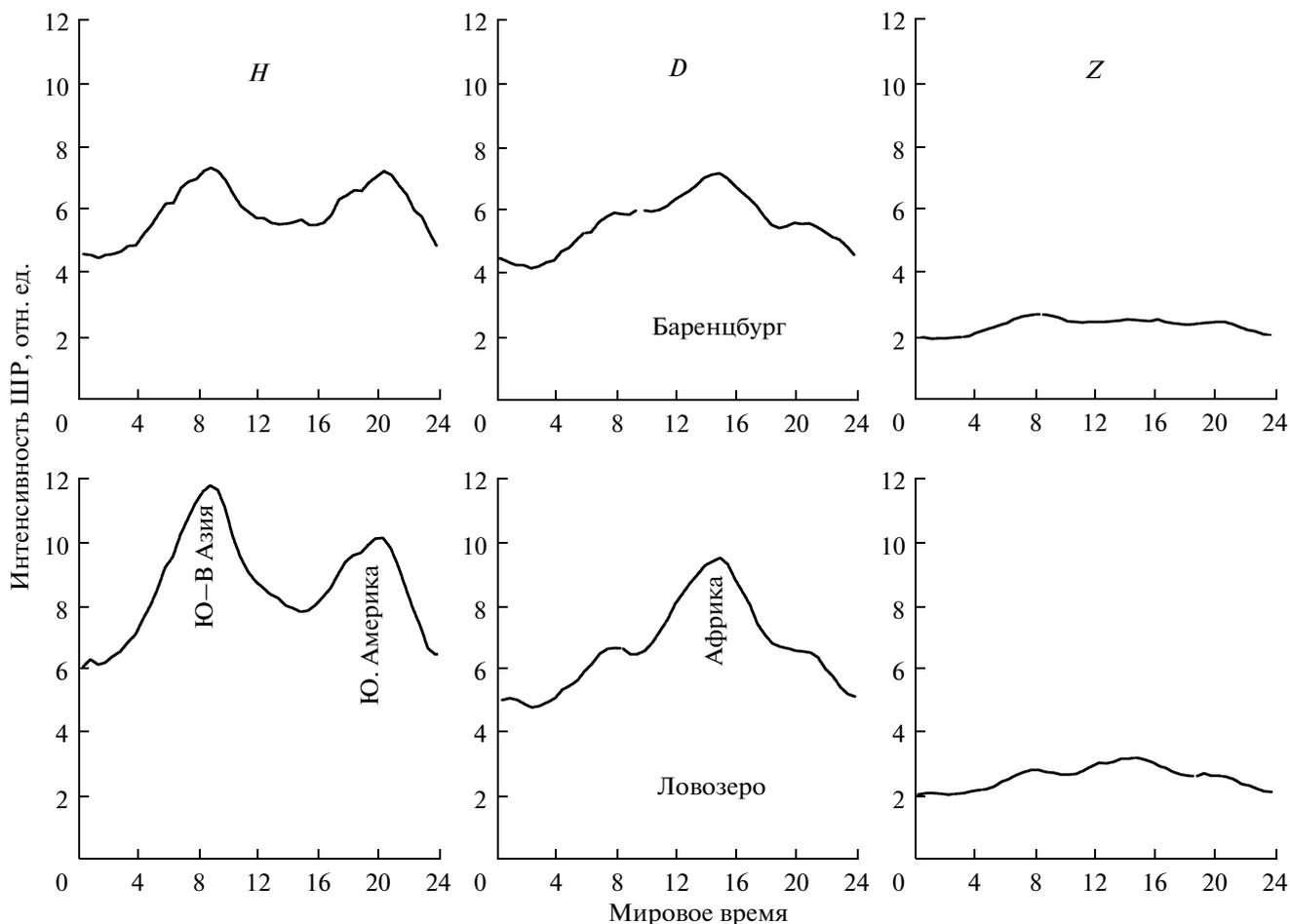


Рис. 3. Суточные зависимости интенсивности ШР в H , D и Z -компонентах в обсерваториях Баренцбург и Ловозеро.

вблизи горизонтальной оси, т.е. магнитного меридиана, а в обе. Ловозеро угол наклона составляет около -5° , т.е. эллипс слегка наклонен вверх.

Полусуточная волна присутствует и в суточных ходах эллиптичности. Эллиптичность выше в горизонтальной плоскости, т.е. там поляризация ближе к круговой; средние значения на обеих станциях примерно равны, ~ 0.6 . В вертикальных плоскостях они заметно различаются: в обс. Баренцбург – 0.42, а в обс. Ловозеро ~ 0.35 . Поляризация ближе всего к линейной в 08:00 и 20:00 UT.

Для обеих плоскостей находилось и направление вращения магнитного вектора. За каждый получасовой интервал определялось в горизонтальной плоскости число случаев поворота вектора от D к H , обозначим его n_{DH} , и от H к D , n_{HD} . В вертикальной плоскости аналогично определялись величины n_{ZH} и n_{HZ} . Ось Z на наших станциях направлена вниз. Обозначим отношение числа случаев вращения от D к H к числу случаев вращения от H к D через $r_{hor} = n_{DH}/n_{HD}$ и подобным образом $r_{ver} = n_{ZH}/n_{HZ}$. На рисунке 6 представлены суточные вариации величин r_{hor} (верхний ряд) и r_{ver} (нижний ряд) для обеих станций как для каждого

из десяти рассмотренных дней (точечные кривые), так и усредненные (сплошные жирные). Очевидна резкая асимметрия направления вращения: в горизонтальной плоскости вращение в большинстве случаев происходит от D к H , а в вертикальной – от Z к H . В среднем превышение составляет от десяти до двадцати раз, в одном интервале – до ста раз. Направление вращения в случае на рис. 4 является типичным. В обс. Баренцбург преобладание одного направления вращения выражено более резко, чем в обс. Ловозеро. Суточные вариации в горизонтальной и вертикальной плоскостях на каждой из станций подобны по форме и близки по величине. На всех четырех панелях видны максимумы r_{hor} и r_{ver} около 08:00 и 20:00 UT.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставим представленные выше результаты с данными в литературе. Суточные вариации ШР как отдельно Z -компоненты (см. рис. 3), так и малой полуоси эллипса b (см. рис. 5), показывают, что вертикальная составляющая в обеих обсерваториях в три–четыре раза меньше суммарной го-

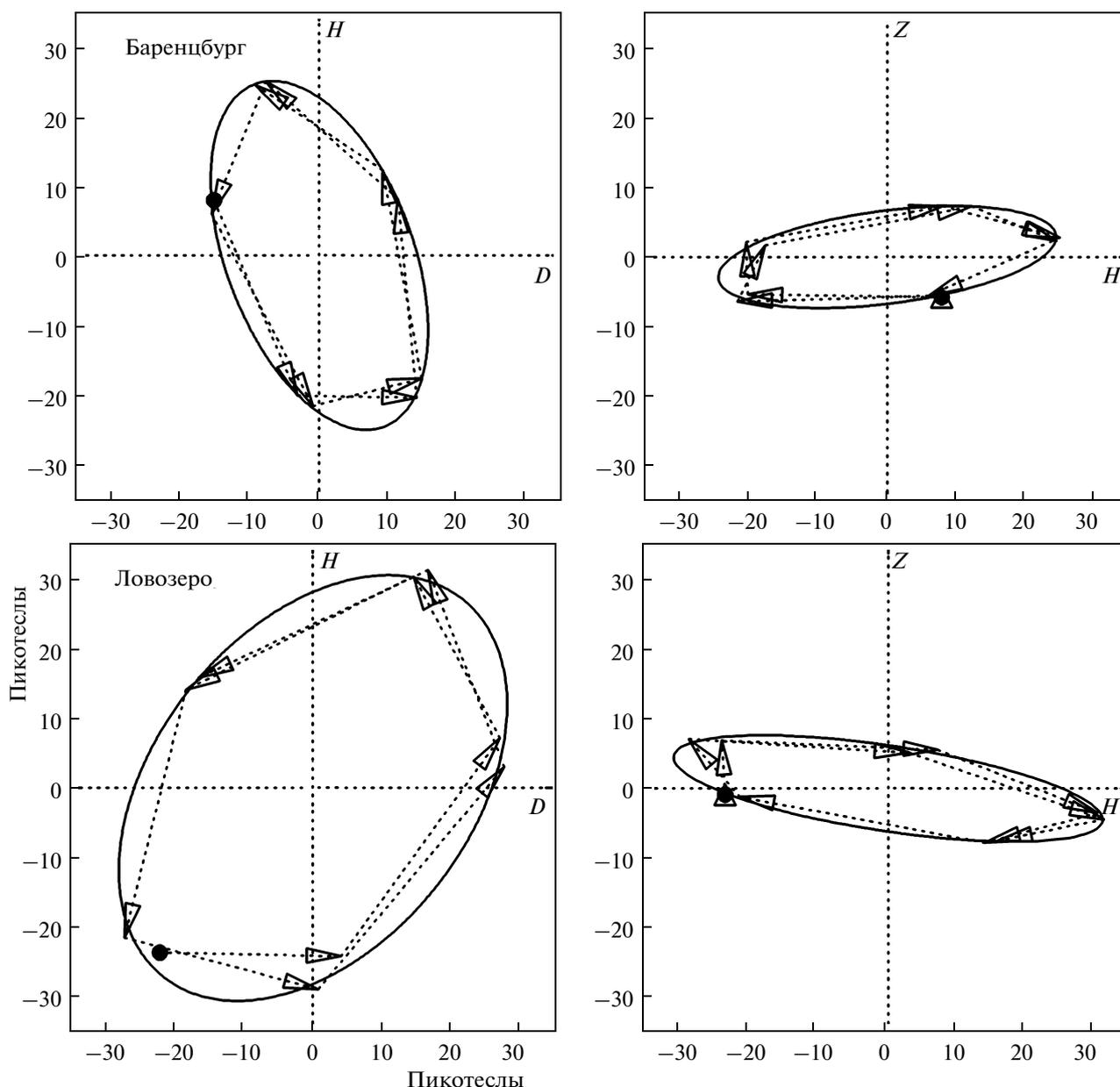


Рис. 4. Пример эллипсов поляризации в (D, H) и (H, Z) -плоскостях, где по осям интенсивность в пикотеслах. Зачерненные кружки указывают начальную точку.

ризонтовой. Подобное соотношение отмечено и для наблюдений на Камчатке в обс. Карымшино, [Roldugin et al, 2004a]. Этот результат резко отличается от измерений на глубине моря 70 м: по данным Ames and Vehslage [1981] на частоте 20 Гц, вблизи третьей частоты ШР, вертикальная компонента превышает горизонтальную в восемь раз. На этой частоте в морской воде толщина скин-слоя около 50 м, т.е. меньше глубины, и из-за высокой диэлектрической проницаемости воды поляризация волны на дне изменяется.

Отсутствие суточной вариации ориентации оси эллипса в обс. Ловозеро и наличие полусуточной волны ее в обеих плоскостях в обс. Баренц-

бург (см. рис. 5), естественно объяснить влиянием проводимости земли в разных геологических условиях обсерваторий. Индукция вносит вклад не только в вертикальную, но и в горизонтальную компоненту, и неоднородности проводимости вблизи обс. Баренцбург (меридианально расположенный фьорд и угольные пласты) искажают направление прихода волны. Косвенным подтверждением такого объяснения может служить меньшая изменчивость суточной вариации интенсивности ШР в обс. Баренцбург по сравнению с обс. Ловозеро, где неоднородности проводимости малы (см. рис. 3): в обс. Баренцбург африканский грозовой центр вносит заметный вклад не

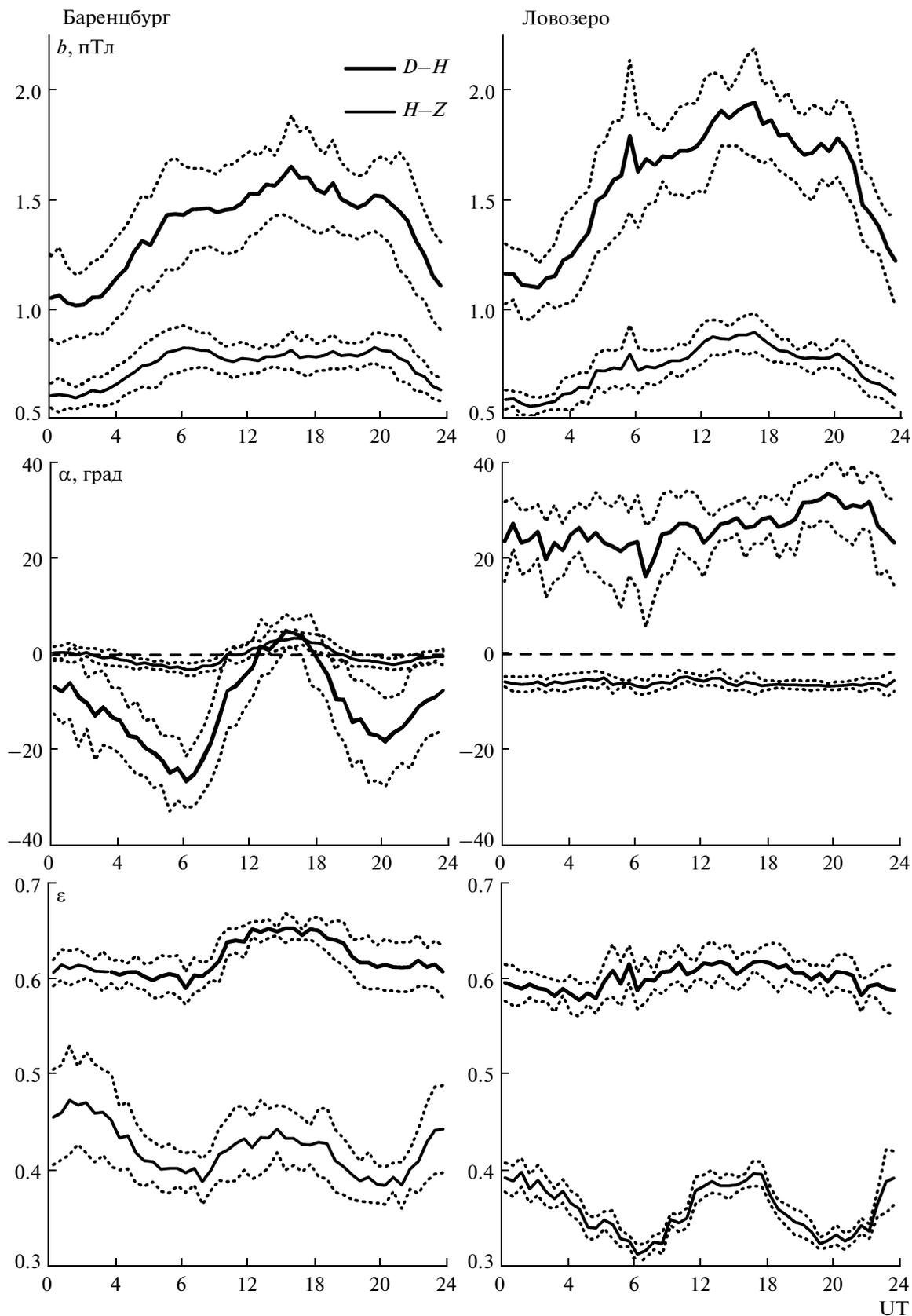


Рис. 5. Суточные вариации параметров эллипсов поляризации в обсерваториях Баренцбург (слева) и Ловозеро (справа). Сверху вниз: малая полуось b , наклон эллипса α к оси абсцисс и эллиптичность ϵ . Жирные линии для горизонтальной плоскости, тонкие – для вертикальной, пунктирными кривыми показаны среднеквадратичные отклонения.

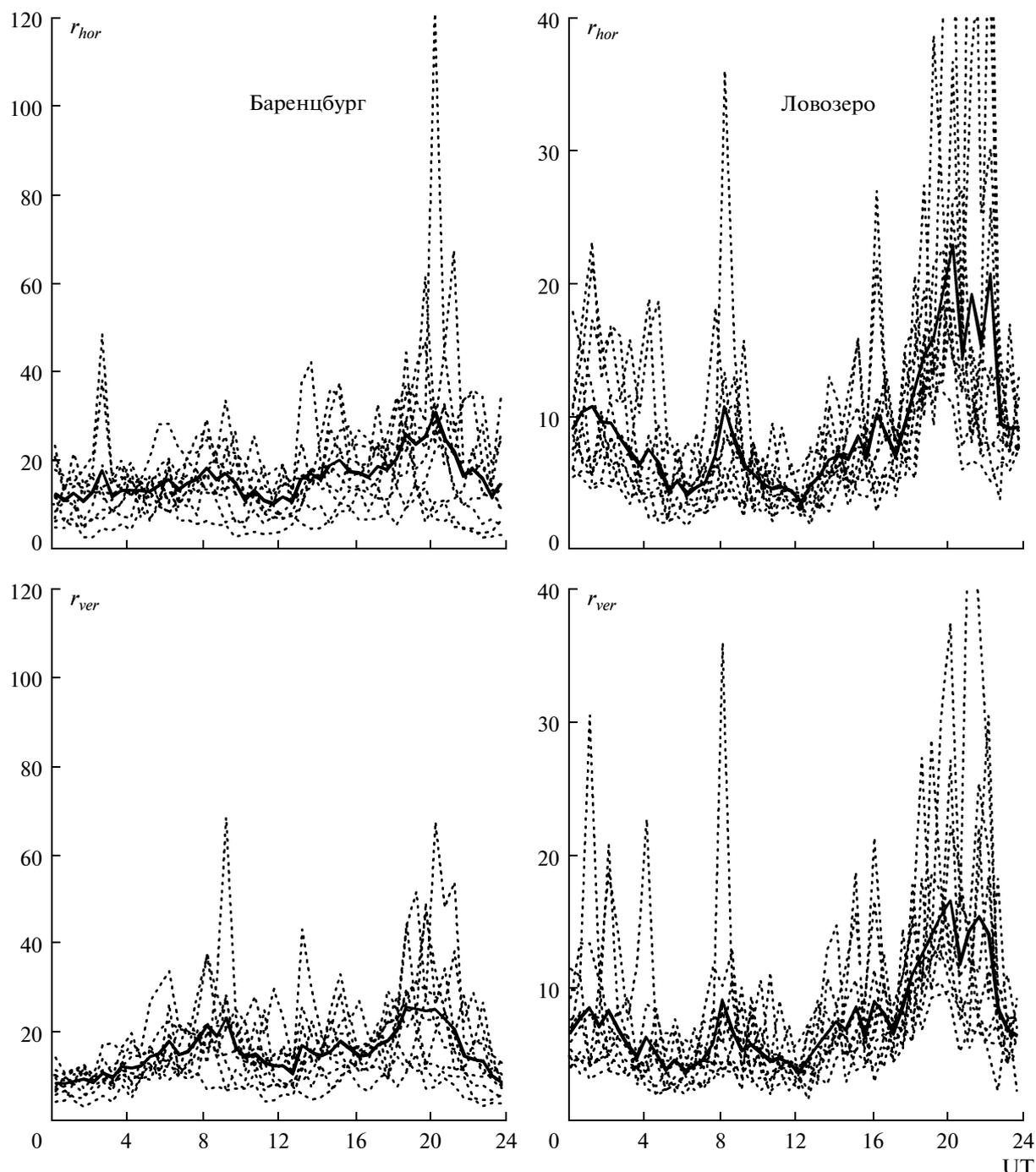


Рис. 6. Суточные вариации отношения числа случаев с левым вращением к правому в obs. Баренцбург (слева) и obs. Ловозеро (справа) в горизонтальной (r_{hor}) и вертикальной плоскости (r_{ver}).

только в D , но посредством индукции и в H -компоненту, а азиатский и американский — искажают D -составляющую.

Эллиптичность в горизонтальной плоскости в obs. Баренцбург днем, равна 0.65, ночью 0.61. В obs. Ловозеро ее суточный ход выражен слабо, в среднем $\epsilon = 0.60$. В obs. “Борок” ($\Phi = 53.7^\circ$), согласно работе [Русаков и Бакстов, 1988], днем $\epsilon = 0.25$, а ночью $\epsilon = 0.21$. На о-ве Крит ($\Phi = 28.0^\circ$), согласно

[Bosinger and Shalimov, 2004], е для ШР днем равна около 0.15, ночью она близка к нулю. Тенденция к уменьшению ϵ при уменьшении широты, однако, нарушается измерениями на Table Mountain ($\Phi = 27.7^\circ$), где она, согласно [Sentman, 1987] днем по абсолютной величине около 0.1, а ночью 0.7.

В работах [Sentman and Fraser, 1991; Melnikov et al., 2004] было показано, что интенсивность, а

также частота и ширина полосы ШР зависят от освещенности D -слоя ионосферы над обсерваторией. Обсерватории Баренцбург и Ловозеро различаются как по широте, так и по долготе, разница местных времен равна 1ч 23 мин. В местный полдень 5 декабря в обс. Баренцбург (11:03 UT) угол погружения Солнца равен 10.3° , что соответствует высоте тени около 105 км, выше D -слоя, и поэтому максимум эллиптичности в обеих плоскостях между 12:00 и 16:00 UT с освещенностью D -слоя не связан. В обс. Ловозеро, где в полдень D -слой освещен, суточной вариации эллиптичности в горизонтальной плоскости практически нет. Можно заключить, что широта и освещенность не являются определяющими для эллиптичности. Наличие в вертикальной плоскости минимумов эллиптичности около 08:00 и 20:00 UT связано, видимо, с удаленностью наших станций от геомагнитных меридианов азиатского и американского грозовых центров, наиболее активных в это время, так что большой вклад вносит излучение с поперечной магнитному полю компонентой, усиливающей H -составляющую. Условия распространения волны, видимо, являются определяющими и для преимущественного направления вращения от D к H на наших станциях. Это направление вращения по общепринятой терминологии левое, и оно отмечено как преимущественное в субавроральной обс. Борок Русаковым и Бакстовым, [1988]. На низкоширотной обсерватории о-в Крит, находящейся примерно в том же долготном секторе, что Ловозеро, Баренцбург и Борок, и где находится африканский грозовой центр согласно работе [Bosinger and Shalimov, 2004], ночью поляризация почти линейная, а днем вращение также левое. В обс. Table Mountain [Sentman, 1987], однако, направление вращения днем правое, а ночью левое [Sentman, 1987]. В отличие от о-ва Крит, в долготном секторе этой обсерватории нет центров грозовой активности, и направление распространения приходящих сюда волн — поперек магнитного поля.

6. ВЫВОДЫ

По наблюдениям шумановского резонанса в высокоширотных обсерваториях Ловозеро и Баренцбург вблизи зимнего солнцестояния определены суточные вариации эллипсов поляризации в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Вертикальная составляющая на обеих станциях в три–четыре раза меньше горизонтальной. Ее суточные вариации определяются анизотропией проводимости земли вблизи обсерватории. Анизотропия влияет также и на суточное вращение оси эллипса поляризации, и на эллиптичность. Эллиптичность в высоких широтах выше, чем на средних. На обеих станциях наблюдается в основном левое вращение оси поляризации.

Как суточные вариации, так и поведение эллипса поляризации указывают на определяющую

роль в возбуждении излучения на частоте шумановского резонанса молниевых разрядов, а не магнитосферщиионосферных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ames M.P., Jr., Vehslage L.M. Low frequency geomagnetic fluctuations (0.025 to 20 Hz) on the floor of Monterey Bay // M.S. Thesis Naval Postgraduate School, Monterey, CA. 1981.
- Bosinger T., Shalimov S.L. Dispersive changes in magnetic background noise polarization at 0.1 to 6 Hz during sunset and sunrise at $L = 1.3$ // Ann. Geophysicae. V. 22. № 6. P. 1989–2000. 2004.
- Holtman P.M., McAskill B.J. The spatial coherence of Schumann activity in the polar cap // J. Atmos. Terr. Phys. V. 50. № 2. P. 83–92. 1988.
- McDevit G.R., Homan B.B. Low frequency geomagnetic fluctuations (.04 to 25 Hz) on land and on the floor of Monterey Bay // M.S. Thesis Naval Postgraduate School, Monterey, CA. 1980.
- Melnikov A., Price C., Safari G., Fulekrug M. Influence of the solar terminator passages on Schumann resonance parameters // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 66. № 9. P. 1187–1194. 2004.
- Roldugin V.C., Maltsev Y.P., Vasiljev A.N., Schokotov A.Y., Belyajev G.G. Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts // J. Geophys. Res. V. 109. № 8. A01216, doi:10.1029/2003JA010019. 2004a.
- Roldugin V.G., Maltsev Y.P., Vasiljev A.N., Schokotov A.Y., Belyajev G.G. Diurnal variations of Schumann resonance frequency in NS and EW magnetic components // J. Geophys. Res. V. 109. № 8. A08304, doi:10.1029/2004JA010487. 2004b.
- Roldugin V.C., Vasiljev A.N., Ostapenko A.A. Comparison of the Schumann resonance parameters in horizontal magnetic and electric fields according to observations on the Kola Peninsula // Radio Sci. V. 41. № 2. RS2S07, doi:10.1029/2006RS003475. 2006.
- Sentman D.D. Magnetic elliptical polarization of Schumann resonances // Radio Sci. V. 22. № 4. P. 595–606. 1987.
- Sentman D.D. Detection of elliptical polarization and mode splitting in discrete Schumann resonance excitation // J. Atmos. Terr. Phys. V. 51. № 6. P. 507–520. 1989.
- Sentman D.D., Fraser B.J. Simultaneous observations of Schumann resonances in California and Australia: evidence for intensity modulation by the local height of the D region // J. Geophys. Res. V. 96. № A9. P. 15.973–15.984. 1991.
- Богородский В.В., Гусев А.В., Поляков А.М., Ярцев М.Б. Шумановские резонансы в высоких широтах // Докл. АН СССР, Т. 267. № 6. С. 815–818. 1982.
- Блюх П.В., Николаенко А.М., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля — ионосфера // Киев: Наукова думка. 200 с. 1977.
- Ролдугин В.К., Белоглазов М.И. Об амплитуде шумановского резонанса во время Форбуш-эффекта // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 6. С. 1–7. 2008.
- Русаков Н.Н., Бакастов С.С. Вращение горизонтальной проекции вектора возмущения магнитного поля на частотах шумановского резонанса // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 6. С. 919–922. 1988.