

ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КРАЙНЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Статистические характеристики КНЧЭМ-поля исследуются в связи с разработкой аппаратуры и методики поисков как локальных проводников в рудной электроразведке, так и исследованием слоистых структур в верхних слоях земной коры методом МГЗ для получения обобщенной картины ее стратификации от поверхности вплоть до границы с мантией. В последнее время такое поле привлекает внимание и как потенциальный носитель информации о слоистых структурах верхней части океанических вод.

В 1974-1979 гг. на Кольском полуострове, где ведутся интенсивные электроразведочные съемки и геоэлектрические исследования, одновременно изучались три ортогональные магнитные и три электрические компоненты напряженности ЕЗМП. В качестве преобразователей переменного магнитного поля использовались индукционные магнитоприемники с трансформаторным согласованием [5], что позволило значительно снизить порог чувствительности при равномерной полосе приема от 20 до 1500Гц. Большое внимание было уделено защите индукционных магнитоприемников от акустических и вибропомех. В работе [6] было показано, что даже весьма малые угловые колебания магнитоприемника могут дать в КНЧ-диапазоне помеху, значительно превышающую величину исследуемого сигнала. Поэтому три взаимно-перпендикулярных магнитоприемника, собранные в блок, подвешивались на резиновом шнуровом амортизаторе в закрытом сверху шурфе. Точка

подвеса блока была близка к центру тяжести системы. Было установлено, что на такую систему не действуют даже близкие и сильные виброколебания, вызванные деятельностью людей, и природные вибропомехи.

Преобразователи электрических горизонтальных компонент представляли собой заземленные на концах и вкопанные в землю взаимно перпендикулярные линии. Длина линий выбиралась из расчета необходимого отношения сигнал/шум. Основными шумами являлись собственные шум предварительных усилителей.

Для приема вертикальной электрической компоненты была использована полая сферическая антенна с диаметром шара 30 см, который с помощью фторопластового изолятора был укреплен на шесте из стеклопластика. Использование такой антенны позволило увеличить чувствительность на самых низких частотах диапазона [4]. Первый предусилитель находился внутри сферы, а второй усилитель с предварительной аналоговой фильтрацией — у основания антенны. Система изоляторов обеспечила высокое сопротивление изоляции, не зависящее от климатических условий. Несмотря на относительно небольшую высоту антенны и оптимальную систему растяжек, от ветровых помех полностью избавиться не удалось. Поэтому записи, произведенные во время сильных порывов ветра, отмечались в журнале и в дальнейшем не использовались для анализа. Калибровка вертикальной электрической антенны производилась следующим методом. При отключенных предусилителях производился замер потенциала шара при помощи электрометра. Потенциал шара и окружающего его пространства выравнивался при помощи слабого радиоактивного источника. Одновременно с этим рядом с антенной располагался стандартный измеритель напряженности электростатического поля. Замеры на обоих приборах производились через небольшие промежутки времени. По известной напряженности поля и потенциалу антенны легко вычисляется действующая высота антенны. Калибровка магнитных преобразователей поля производилась при помощи калибровочной рамки.

Для вычисления абсолютного значения электрических горизонтальных полей в соответствии с выводами работы [7] за эффективную длину заземленных линий принималась их геометрическая длина.

Шесть сигналов со всех преобразователей после предварительного усиления [8] и аналоговой фильтрации в полосе от 20 до 1500 Гц поступали на многоканальный аналоговый регистратор с такой же частотной полосой. Динамический диапазон магнитной регистрации составлял 42 дБ. Известно, что ЕЭМІ КНЧ состоит из флукутационной и импульсной составляющих [1-3]. Диапазон изменений этих двух частей по нашим наблюдениям составляет около 60 дБ. Поэтому был подобран оптимальный уровень записи, при котором вершины крайне мощных, относительно редких импульсов обрезались. Это учитывалось при статистической обработке. Для наблюдений было выбрано место, удаленное от помех, создаваемых электросетями. Поэтому никакой фильтрации сигналов от помех частотой 50 Гц и ее гармоник не производилось. Вся приемно-измерительная и регистрирующая аппаратура питалась от аккумуляторов. В комплект аппаратуры входил регистратор гроз ПРТ-1, представляющий собой самопишущий счетчик грозных разрядов в радиусе 300 км. Это позволило в дальнейшем изучить влияние местных гроз на характер ЕЭМІ КНЧ.

С 1977 по 1979 г. в августе - октябре каждого года проведено по три десятидневных сеанса наблюдений. Регистрация шести компонент ЕЭМІ производилась в течение трех минут каждого часа круглосуточно. В дальнейшем меридиональную, широтную и вертикальную компоненты напряженности ЕЭМІ будем обозначать индексами X, Y, Z соответственно.

Статистическая обработка магнитных записей производилась на ЦВМ ОДРА-1204. При обработке сигнал с магнитного регистратора усиливался и поступал на аналого-цифровой преобразователь Ф-733. Частота отсчетов задавалась генератором импульсов. Сигнал с аналого-цифрового преобразователя в виде восьмиразрядного двоичного кода поступал на входное устройство ЦВМ и записывался на магнитный барабан. Для ввода была разработана специальная программа записи. На барабан ЦВМ могло одновременно записываться до 40000 значений анализируемого процесса, что в реальном времени было примерно равно 4 с. Были составлены программы для вычисления оценок интегрального и дифференциального законов распределения, спектральной плотности мощности и автокорреляционной функции. По результатам об-

работки реализаций разной длительности было установлено, что получаемые оценки исследуемых статистических характеристик флуктуационной части ЭМП остаются неизменными при длительностях реализации в среднем, начиная с 2-3 с и более, что свидетельствует о достаточности объема машинной памяти.

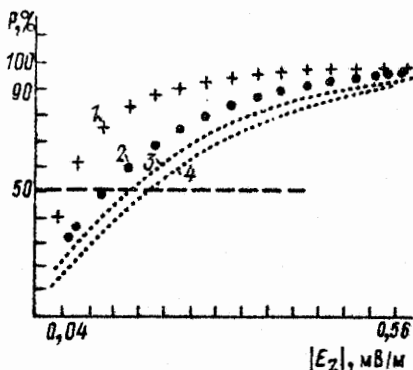


Рис.1.

ля E_2 , по оси ординат - оценка вероятности того, что модуль не превышает соответствующего ей значения на оси абсцисс.

Из рисунка видно, что полученные таким образом приближенные графики статистических функций распределения $P\{|E_2| < |E_2|\}$ не одинаковы для различного времени суток. В приведенном обозначении горизонтальная черта сверху свидетельствует о том, что для оценивания распределения использована усредненная величина модуля. В дальнейшем для простоты этот символ опущен. Установлено, что при отсутствии местных гроз каждые сутки исследованных циклов регистрации характеризуются аналогичным изменением во времени оценок распределений всех компонент поля, т.е. можно говорить о наличии суточной вариации. Для изучения суточных вариаций напряженности поля были выбраны ее медианы (пунктир на рис.1) и значения, соответствующие вероятности 0,9. В дальнейшем изложении они будут именоваться соответственно 50-процентными и 90-процентными уровнями составляющих поля. В качестве примера на рис.2, а приведены суточные вариации 50-процентного уровня E_2 (в условных единицах) за 10 суток с 14 по 24 сентября 1978 г. Видно, что наблюдается вариация с миниму-

Для изучения характера изменений напряженности ЭМП во времени использовались выборочные оценки ее функций распределения. На рис.1 приведены функции для 4-секундных записей компоненты E_2 , произведенных 20 сентября 1979 г. в 6(1), 12(2), 18(4) и 24(3) часа местного (московского) времени. По оси абсцисс отложены величины модуля составляющей по-

мом в 8-12 ч LT и максимумом около 18 ч. Среднесуточная вариация за эти 10 дней построена на рис.2,б. На нем обозначены границы доверительного интервала для среднего значения напряженности, соответствующего 95-процентной доверительной вероятности и рассчитанного по общепринятой методике оценивания [9]. Правомерность такого оценивания обоснована тем, что характер распределения напряженности при отсутствии местных гроз по нашим данным и данным других исследователей [3] приближается к нормальному. Доверительный интервал среднесуточной вариации 50-процентного уровня E_z также изменяется периодически в течение суток. Из приведенных на рис.2 графиков очевидна статистическая значимость вариаций 50-процентного уровня, так как диапазон выделенной среднесуточной вариации на порядок превосходит ширину доверительного интервала для 95-процентной доверительной вероятности.

Аналогичные вариации выделены для других десятидневных сеансов наблюдений и для разных компонент поля. Среднесуточные вари-

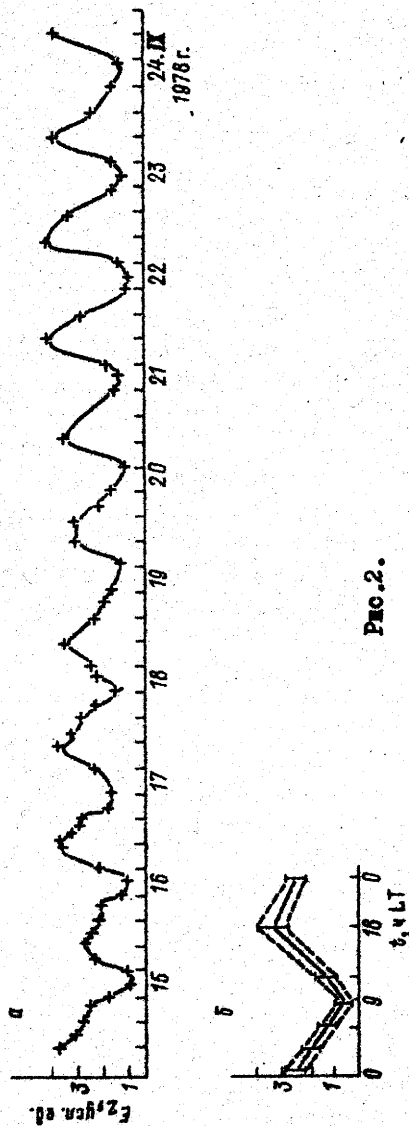


Рис.2.

апии 50-процентного уровня модуля E_z (а-е) и E_x (ж-и) приведены на рис.3, где пунктиром обозначены границы доверительных интервалов для 95-процентной доверительной вероятности. Анализ среднесуточных вариаций компонент, приведенных на рис.3,

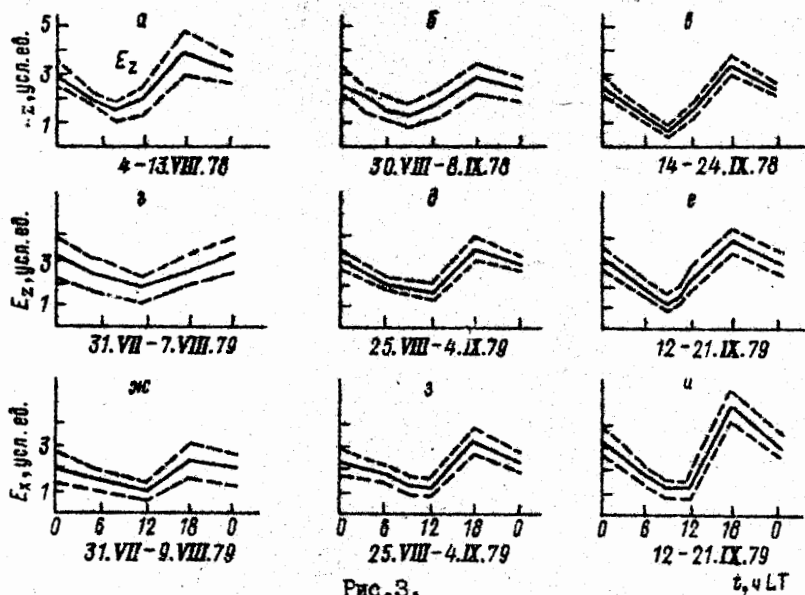


Рис.3.

позволяет сделать два основных вывода. Во-первых, за два месяца перехода от лета к осени на Кольском полуострове в районе полярного круга 50-процентный уровень поля существенно не изменяется. Отличия в особенностях характеристик поля летом и осенью, по-видимому, следует искать на уровнях, соответствующих меньшей вероятности. Во-вторых, за время перехода от лета к осени меняется ширина интервала для 95-процентной доверительной вероятности. При переходе к осени интервал сужается в среднем в 3-5 раз. Таким образом, можно утверждать, что при переходе к осени значения напряженности поля становятся стабильнее, уменьшаются ее отклонения от среднего значения в определенное время суток.

Сходные по интенсивности к времени суточные вариации поля были получены Барсеем для того же периода года по результатам

узкополосных наблюдений характеристик поля в Норвегии на частотах 8, 35, 78 и 115 Гц [10]. Уровень составляющих поля по его данным начинает снижаться с конца октября, причем понижение более заметно с ростом частоты.

Сходство полученных результатов свидетельствует о том, что установленные суточные и сезонные особенности параметров поля имеют региональный характер.

При изучении связи вариаций параметров поля с числом гроз-овых разрядов на Земле наиболее строгим было бы исследование корреляций между вариациями поля и распределением (картой) гроз-овых разрядов. Однако в настоящий момент получить данные о распределении разрядов по всему земному шару в любой момент времени невозможно. Можно воспользоваться поэтому усредненной

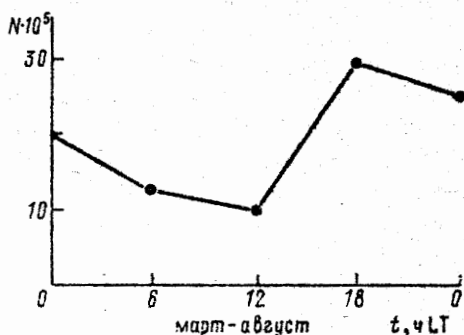


Рис. 4.

вариацией числа гроз-овых разрядов на земном шаре. Усредненная вариация за март-август, показанная на рис. 4 [11] (по оси абсцисс указано московское время), хорошо коррелирует со среднесуточными вариациями всех компонент поля, приведенными на рис. 3. Коэффициент корреляции везде бли-зок к единице, что свидетельствует о связи выделенных вариаций

компонент поля с мировой гроз-овой активностью.

При анализе повторяемости значений 50-процентного уровня модуля составляющих поля обнаружено, что иногда обычный ход суточной вариации нарушается. Чаще всего это выражается в том, что максимум в 18 ч LT сглажен. На среднесуточных вариациях это выражается в увеличении ширины доверительного интервала в соответствующие часы. В работе [9] показано, что явление поглощения радиоволн в полярной шапке не оказывает влияния на вариации КНЧ-поля, по крайней мере в районах южнее географической широты 79°. Отклонения вариаций около 18 ч LT среднесуточно-го хода можно объяснить, воспользовавшись упрощенной моделью мировой гроз-овой активности, предполагающей существование трех

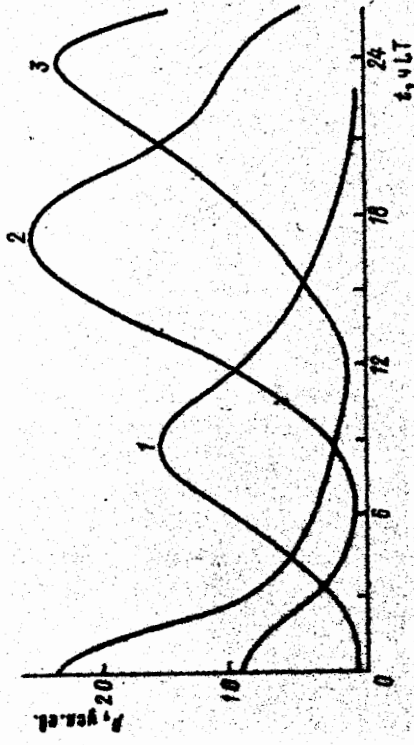


Рис. 5.

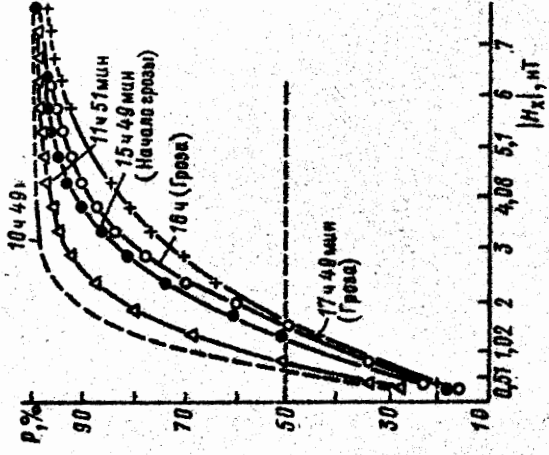


Рис. 7.

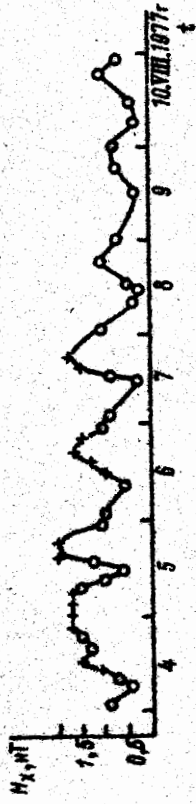


Рис. 6.

1
1
Л
Н
Ч
М
И:
Н
В
Х
И:
Н
О
Н
О
Т
Н
В
К
И
С
З

основных грозových центров активности – азиатского (1), африканского (2) и американского (3). Координаты центров, согласно этой модели, не меняются, а активность изменяется во времени, как показано на рис.5. Максимум активности африканского (2) грозового центра приходится на 18 ч LT (московского) наших наблюдений. Таким образом, можно предположить, что отклонения компонент поля от среднесуточного хода связаны со спадами интенсивности гроз в африканском центре.

Нарушение обычного характера вариаций вызывается также локальными грозами. На рис.6 показано влияние местной грозы на медиану компонента N_x . Значения напряженности поля, полученные вс время местной грозы, обозначены крестиками (кружками обозначены значения напряженности поля в спокойные периоды). Из рис.6 и 7 видно, что местная гроза искажает суточный ход напряженности и повышает медиану модуля составляющей приблизительно в два раза против обычного.

Особенности воздействий местной грозы на статистические характеристики поля в настоящее время нельзя считать до конца изученными. В частности, пока детально неизвестен относительный вклад импульсной и флуктуационной составляющих процесса в общее возрастание уровня, хотя следует ожидать, что возмущения напряженности, вызванные локальной грозой, должны полнее описываться с учетом отдельных оценок статистических характеристик этих составляющих.

При анализе оценок спектральной плотности мощности в разное время суток было выяснено, что больший вклад в суточные вариации вносят спектральные составляющие низких частот. Это иллюстрируется рис.8, где приведены два энергетических спектра компонента E_z , рассчитанных по 4-секундным реализациям за 12 и 18 ч LT (московского времени) 28 августа 1979 г. На низких частотах (20-300 Гц) спектры расходятся. Выброс на частоте около 1000 Гц является результатом отклика высокочастотных активных фильтров низкой частоты на импульсное воздействие. То, что в образовании суточной вариации доминируют низкие частоты, доказывает также сравнение среднесуточных вариаций значений среднего уровня напряженности на частотах 78 (крестики) и 780 Гц (кружочки), показанных на рис.9. Так как эти значения существенно отличаются по абсолютной величине, на ри-

сунке они приведены в относительных единицах и нормированы на свое максимальное значение. Видно, что вариация на частоте 78 Гц хорошо коррелирует с вариациями, приведенными на рис.3, в то время как на частоте 780 Гц с 15 до 24 ч (время московское) корреляция не наблюдается. Подчинение суточного изменения поля суточному ходу глобальной активности исчезает выше 300 Гц.

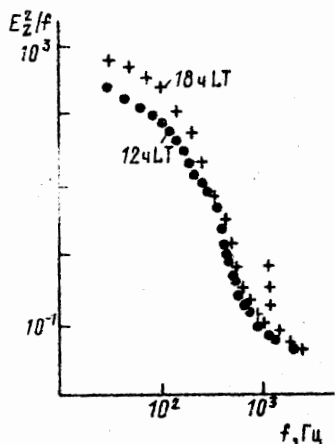


Рис.8.

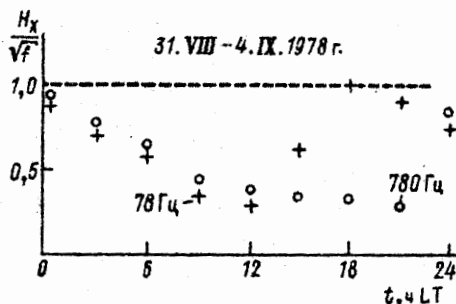


Рис.9.

Энергетический спектр ЕЭМП в условиях местной грозы также изменяется по сравнению с невозмущенными условиями. В полосе от 20 до 1500 Гц он увеличивается с приближением грозы равномерно на средних частотах и резко — на низких.

При анализе вариаций 90-процентного уровня напряженности обнаружено, что в отсутствие местных гроз их характер качественно не изменяется. Среднесуточные вариации 90-процентного уровня практически пропорциональны вариациям медианы.

Далее приведены пределы изменений пространственных компонент поля для периода июль — октябрь на Кольском полуострове:

$$\begin{array}{cccccc}
 H_x \cdot 10^7 & H_y \cdot 10^7 & H_z \cdot 10^7 & E_x \cdot 10^7 & E_y \cdot 10^7 & E_z \cdot 10^7 \\
 \text{А/м} \cdot \text{Гц}^{-1/2} & & & & & \text{В/м} \cdot \text{Гц}^{-1/2}
 \end{array}$$

Флуктуационная	0,80± ±6,35	0,80± ±6,35	0,48± ±0,80	0,2± ±1,0	0,2± ±1,0	1,2± ±6,0
Импульсная ...	> 2,40	> 2,40	> 0,24	> 6	> 6	> 30

Следует учитывать, что оценки этих пределов относятся, главным образом, к нижней части КНЧ-диапазона, в которой составляющие подчиняются ходу глобальной грозовой активности (20+100 Гц). При этом нижние пределы значений соответствуют минимумам глобальной активности и отсутствию местных гроз, а верхние - их наличию. Верхние пределы импульсной составляющей даны по оценке выходов регистрируемых процессов за пределы динамического диапазона приемно-регистрирующей аппаратуры.

В результате проведенных исследований установлено, что в широкой полосе частот существует суточная вариация уровня напряженности, хорошо согласующаяся с вариациями [9] на отдельных частотах КНЧ-диапазона. Эта вариация в основном обеспечивается низкочастотными составляющими и коррелирована с вариацией мировой грозовой активности. Переход от лета к осени проявляется, главным образом, в сужении доверительного интервала среднесуточных вариаций. При этом значения средних уровней составляющих поля меняются мало. Суточная вариация уровня существенно искажается под влиянием местной грозовой активности. Требуется дальнейшее изучение характера этого влияния с привлечением раздельных оценок статистических характеристик импульсной и флуктуационной составляющих поля.

У к а з а т е л ь л и т е р а т у р ы

1. Радиопомехи КНЧ-диапазона и их природа /Под ред. Куяина В.Н. Рязань, 1976. 118 с.
2. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СМЧ /Под ред. Александрова М.С. М., 1972: 37 с.
3. Ginsberg L.H. Extremely low frequency (ELF) atmospheric noise level statistics for project Sanguine. - IEEE Trans. Commun., 1974, vol.22, N 4, p.551-561.

4. Ogawa T., Tanaka Y., Yasuhara M. Schumann resonances and worldwide thunderstorm activity - diurnal variations of the resonant power of natural noises in the earth-ionosphere cavity. - J.Geomagn. Geoelectr., 1969, vol. 21, N 1, p.447-452.
5. Устройство для измерения переменного магнитного поля /Артамонов Л.В., Моисеев О.Н., Молочнов Г.В., Пикулев Е.Г., Савельев А.А., Успенский И.Н. Авт.свид. СССР, 1976, № 528524.
6. Емельянов Ю.Н. Составляющие э.д.с. вибропомехи в магнитоприемниках. - В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., 1967, вып. 34, с.119-127.
7. Вешев А.В., Яковлев А.В., Сапожников В.Г. Эквивалентные схемы и параметры приемных линий. - В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., 1974, вып.55, с.46-56.
8. Артамонов Л.В., Майоров Ю.А., Пикулев Е.Г. Малошумящие входные усилители геофизической аппаратуры. - В кн. Геофизическая аппаратура. Л., 1975, вып.57, с.71-79.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., 1974. 464 с.
10. Larsen T.R. ELF noise measurements. - ELF-VLF Radio Wave Propagat. Proc. NATO Adv. Study Inst. Spatind., 1974, Dordrecht; Boston, 1974, p.233-238.
11. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля - ионосфера. Киев, 1977, 200 с.
12. Справочник по геофизике /Под ред. Вайсберга О.Л. и др. М., 1965. 571 с.

УДК 550.837

М.А.Добровольская, А.А.Ковтун,
Е.Л.Коквина, Г.П.Шолпо

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ РС-З

В течение ряда лет кафедрой физики Земли Ленинградского университета под руководством О.М.Распопова проводились одновременные наблюдения пульсаций в интервале 10-200 с. Материа-

лы
вол
рак
РС-
[1]
хар
Д.А.
числ
пре
рак
РС-З
вуел
разд
В на
нее
ракт
лени
для
мо в
мелн
чекс

дили
реги
обнч
тече
рале
- ре
ная
ее а
резон
веде
Числ
са и
да ц
не я
магн
Ашха