



## ДАЛЬНЕЙШИЙ АНАЛИЗ ТРЕНДОВ $foE$ НА СТАНЦИИ JULIUSRUH

А.Д. Данилов, А.В. Константинова

Дальнейший детальный анализ данных вертикального зондирования на станции Juliusruh позволил подтвердить и уточнить выводы, полученные в предыдущих публикациях авторов. Подтверждено наличие суточного хода тренда критической частоты ионосферного слоя  $E$ ,  $foE$ , с изменением знака тренда с положительного на отрицательный при переходе от утренних часов к вечерним и наличие сезонных вариаций этого тренда: и для утренних и для вечерних часов он увеличивается по абсолютной величине при переходе от летних месяцев к зимним. Обнаружена линейная зависимость абсолютной величины тренда от расстояния в часах от местного полудня.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ, СЛОЙ  $E$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах авторов [Данилов и Константинова 2018б; Danilov and Konstantinova, 2018] были рассмотрены долговременные тренды критической частоты  $foE$  ионосферного слоя  $E$   $k(foE)$  по данным наблюдений на нескольких ионосферных станциях, включая станцию Juliusruh. Были получены принципиально новые выводы о наличии суточных и сезонных вариаций  $k(foE)$ , в частности, неожиданный вывод о том, что знак тренда меняется со временем суток: до полудня тренды  $foE$  положительны, а после полудня – отрицательны.

В ходе дальнейшего детального анализа данных по станции Juliusruh выяснилось, что в исходных данных вертикального ионосферного зондирования вкралась небольшая ошибка – для нескольких часов произошло смещение величин  $foE$  с LT на UT, что в случае станции Juliusruh означает смещение на один час. Анализ скорректированных данных показал, однако, что все выводы по станции Juliusruh, полученные в указанных выше предыдущих работах остаются совершенно правильными качественно, а количественно отличаются очень слабо от результатов новых расчетов, приведенных в данной работе. Кроме того, в результате этого анализа удалось получить ряд новых результатов, касающихся поведения  $k(foE)$  с местным временем.

Описанию результатов указанного анализа и посвящена данная работа.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Анализ трендов  $foE$  проводился методом, предложенным авторами и использованным в серии работ авторов по поиску трендов параметров слоя  $F2$ , а также в предыдущих работах по анализу трендов  $foE$ . Описание метода в приложении к поиску трендов  $foE$  можно найти в работах [Данилов и Константинова, 2018а; Danilov and Konstantinova, 2018].

Напомним здесь для облегчения понимания дальнейшего изложения лишь что в применяемом нами методе тренды находятся как наклон линейной аппроксимации величин  $\Delta foE$ . Последние, в свою очередь, представляют собой сглаженную с 11-летним окном разницу между наблюдаемыми величинами  $foE$  в течение анализируемого периода и величинами  $foE$  при том же уровне солнечной активности (характеризуемом индексом  $F10.7$ ) в «эталонный» период 1957-1980 гг. «Эталонные» зависимости  $foE$  от  $F10.7$ , как правило, имеют высокий индекс определенности по F-тесту Фишера  $R^2$  и неоднократно приводились в предыдущих работах авторов.

Примеры полученных зависимостей  $\Delta foE$  от времени для станции Juliusruh приведены на рисунках 1-4. Мы сознательно приводим большое количество рисунков, охватывающих разные моменты местного времени и разные сезоны, чтобы продемонстрировать, что полученный характер изменения  $\Delta foE$  со временем типичен для всех рассмотренных месяцев и сезонов.

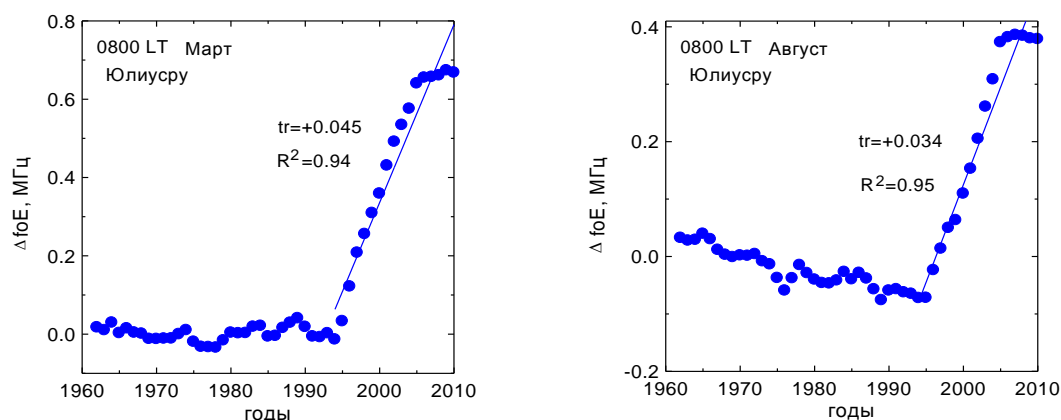


Рис. 1. Изменение величины  $\Delta foE$  со временем для 0800 LT в марте и августе.

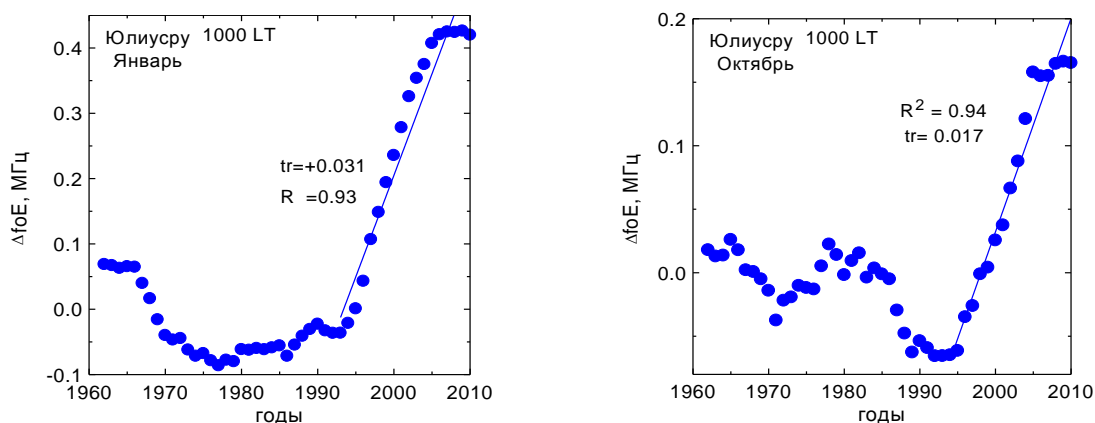


Рис. 2. Изменение величины  $\Delta foE$  со временем для 1000 LT в январе и октябре.

На рисунках 1 и 2 приведено изменение  $\Delta foE$  в дополуночные часы (0800 и 1000 LT, соответственно). Видно, что существенное монотонное изменение этой величины начинается около 1994 г. До этого времени величина  $\Delta foE$  либо практически постоянна и близка к нулю (март, 0800 LT), либо демонстрирует небольшие изменения, которые, скорее всего вызваны небольшими изменениями  $foE$ , связанными с какими-то другими факторами, а не с зависимостью от солнечной активности и не с долговременными трендами. Сколь-нибудь заметных трендов  $foE$  до 1994 г. не наблюдается. Самой главной особенностью указанных рисунков является то, что после 1994 г. наблюдается хорошо выраженный статистически значимый (высокие величины  $R^2$ ) положительный тренд с достаточно высокой абсолютной величиной. Подробный анализ изменения этой величины с сезоном и временем суток будет приведен ниже.

На рисунках 3 и 4 приведено изменение величины  $\Delta foE$  со временем для в послеполуночный период (1500 и 1600 LT, соответственно). Видно, что до примерно 1994 г. эта величина мало изменяется и близка к нулю на всех четырех графиках. После 1994 г. наблюдается хорошо выраженный и статистически значимый (высокие величины  $R^2$ ) тренд, но в отличие от рис. 1 и 2, он имеет отрицательный знак.

Сводка всех полученных величин  $k(foE)$  для ст. Juliusruh приведена в табл. 1. При взгляде на таблицу обращает на себя внимание изменение этой величины с сезоном и местным временем. Еще более наглядно это изменение иллюстрирует рис. 5.

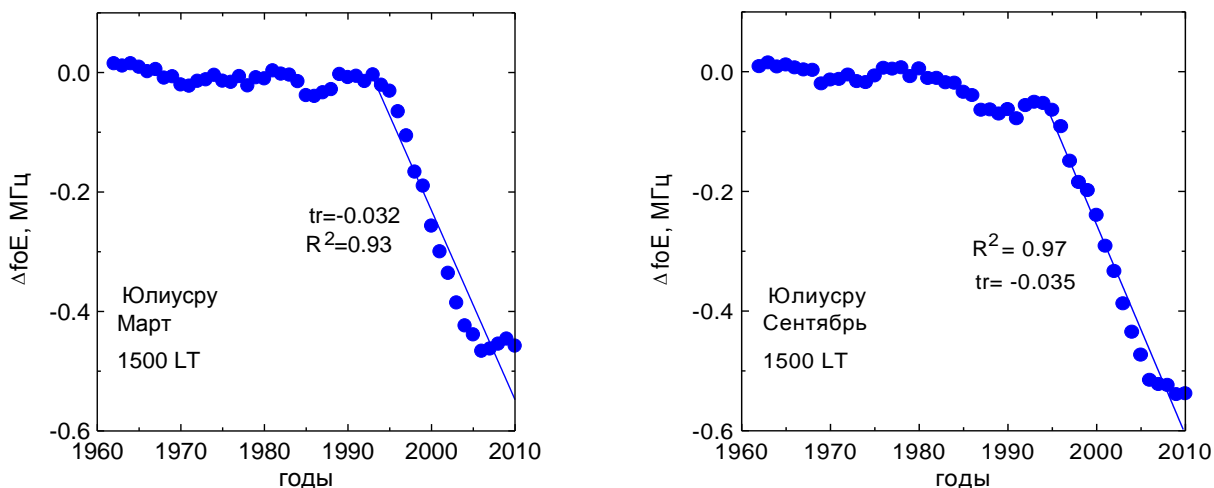


Рис. 3. Изменение величины  $\Delta foE$  со временем для 1500 LT в марте и сентябре

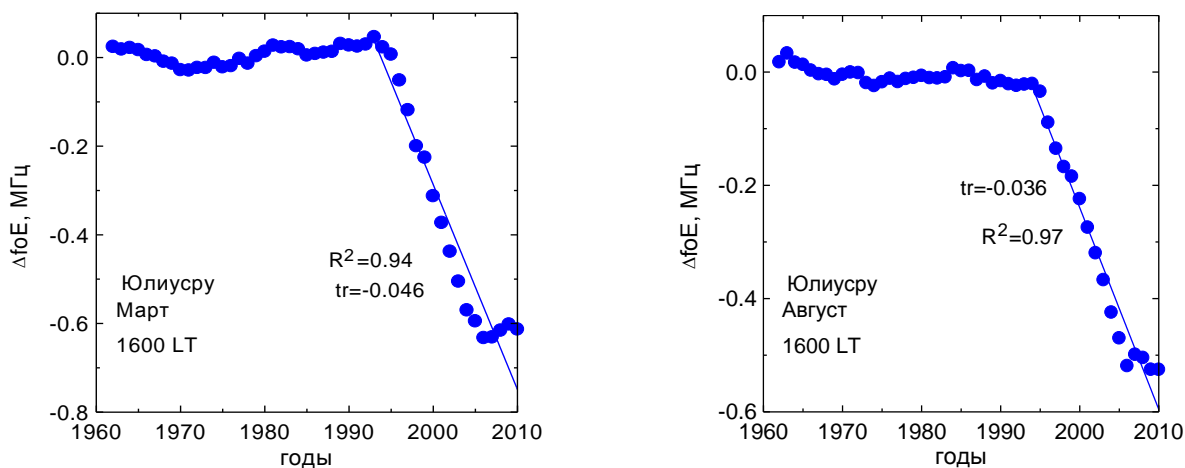


Рис. 4. Изменение величины  $\Delta foE$  со временем для 1600 LT в марте и августе

Таблица 1. Величины  $k(foE)$  для станции Juliusruh в различные моменты LT и месяцы.

Месяц	08LT	09LT	10LT	11LT	12LT	13LT	14LT	15LT	16LT	17LT
январь		0.043	0.031	0.014			-0.030			
февраль		0.037	0.026	0.014	0	-0.011	-0.028	-0.047		
март	0.045	0.034	0.019	0.009		-0.010	-0.022	-0.032	-0.046	
апрель	0.034	0.022	0.011	0.002	-0.003	-0.008	-0.018	-0.028	-0.038	-0.053
май	0.027	0.019	0.012	0.004		-0.010	-0.03	-0.025	-0.035	-0.053
июнь	0.025	0.017	0.010	0.004	0	-0.009	-0.011	-0.020	-0.035	-0.035
июль	0.026	0.014	0.007	0		-0.009	-0.018	-0.024	-0.030	-0.040
август	0.034	0.019	0.009	0		-0.013	-0.020	-0.027	-0.036	-0.063
сентябрь	0.039	0.021	0.016	0.006	-0.001	-0.012	-0.021	-0.035	-0.047	
октябрь		0.034	0.017	0.005		-0.017	-0.033	-0.045		
ноябрь		0.035	0.022	0.008	-0.007	-0.024	-0.036			
декабрь			0.025	0.010			-0.037			

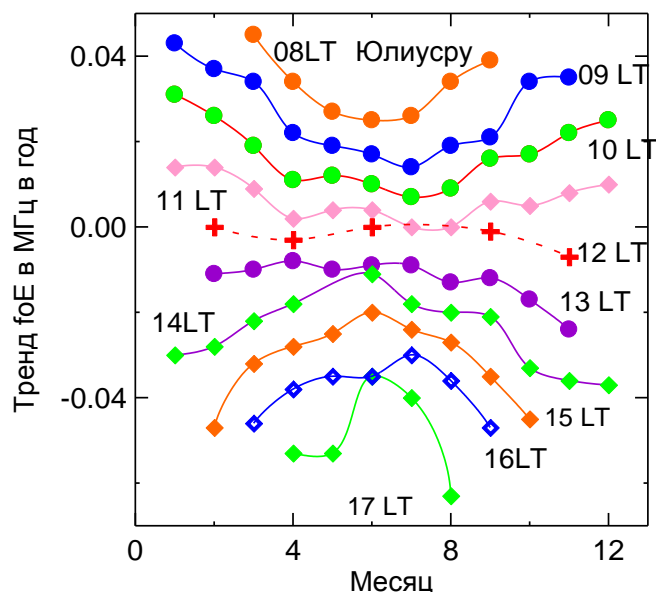


Рис. 5 Изменение трендов  $foE$  на ст. Juliusruh с местным временем и сезоном.

И таблица 1 и рис. 5 дают очень четкую картину изменения  $k(foE)$  со временем суток: тренды  $foE$  положительны в дополуночный период суток, почти отсутствуют (очень малы или равны нулю) в районе полудня и отрицательны в послеполуденный период суток.

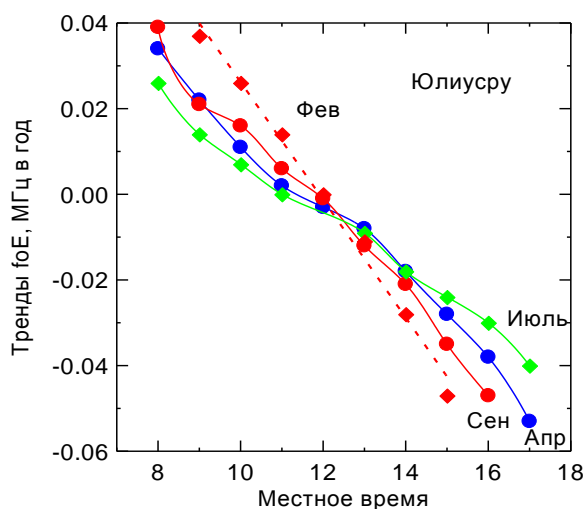


Рис. 6. Изменение тренда  $foE$  с местным временем в разные месяцы.

Вывод о разном знаке тренда  $foE$  в утренние и вечерние часы представляется неожиданным и совершенно новым. Авторам не известны работы, где знак тренда какого-либо из параметров ионосферных слоев менялся от утренних к вечерним часам.

На рисунке 6 представлена еще одна иллюстрация указанной зависимости  $k(foE)$  от LT. На этом рисунке приведен ход  $k(foE)$  от LT для месяцев, представляющих разные сезоны: зиму, лето и равноденствие. Видно, что характер зависимости тренда от местного времени хорошо выражен и практически одинаков для всех сезонов.

В таблице 1 и на рис. 5 хорошо виден и сезонный ход  $k(foE)$ : и для утренних и для вечерних моментов LT тренды растут по абсолютной величине от летних месяцев к зимним.

В предыдущей работе авторов [Danilov and Konstantinova, 2018] уже проводилось сравнение изменения  $\Delta foE$  за все исследуемые годы на станциях Juliusruh и Rome. На рисунке 7 приведен еще один пример такого сравнения.

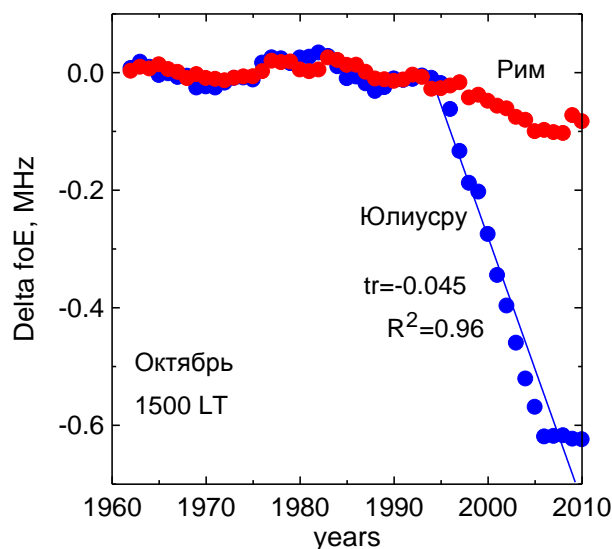


Рис. 7. Сравнение изменения величины  $\Delta foE$  на ст. Juliusruh и Rome.

Рисунок 7 (так же, как и рисунки, приведенные в работе [Danilov and Konstantinova, 2018] для других месяцев и моментом LT) наглядно показывает, что величина  $\Delta foE$  на ст. Rome очень слабо меняется со временем и не дает сколь-нибудь заметного тренда  $foE$ .

Детальный анализ изменения величины тренда  $foE$  на ст. Juliusruh со временем суток позволил выявить еще одну удивительную особенность этого изменения. Оказалось, что величина тренда  $k(foE)$  линейно зависит от момента LT. Это обстоятельство прекрасно видно на рис. 8.

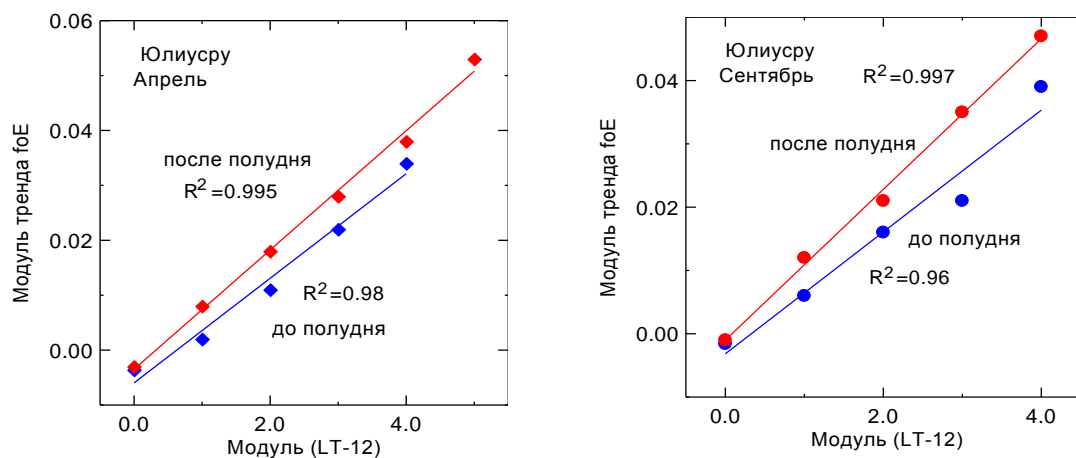


Рис. 8. Зависимость модуля тренда  $foF2$  от расстояния в часах момента измерения от местного полудня.

На этом рисунке по оси ординат отложен модуль величины  $k(foE)$ , т.е. утренний (положительный) тренд так, как он есть, и вечерний (отрицательный) тренд с обратным знаком. По оси абсцисс отложена разница в часах между полуднем и моментом наблюдения. Например, 2.0 соответствует 1000 LT для дополуночных трендов и 1400 LT для послеполуночных трендов.

Два обстоятельства на рис. 8 вызывают удивление. Во-первых, послеполуночные точки ложатся на прямую с большой точностью в обоих приведенных на рисунке примерах (величины  $R^2$  составляют 0.995 и 0.997). Дополуночные точки также близки к линейной аппроксимации ( $R^2$  равен 0.98 и 0.96). Во-вторых, наклоны линий, аппроксимирующих дополуночные и послеполуночные точки на каждом из рисунков, близки между собой. Это означает, что уменьшение положительных величин  $k(foE)$  при движении от утра к полудню и увеличение амплитуды отрицательных величин  $k(foE)$  при движении от полудня к вечеру происходит в одном и том же темпе, причем оба изменения с большой точностью описываются линейной зависимостью. Аналогичная картина наблюдается для ст. Juliusruh и для других месяцев.

Мы не в состоянии пока объяснить указанные факты. Однако, очевидно, что они могут быть очень важны при поисках физических механизмов, объясняющих суточные и сезонные вариации трендов  $foE$ , обнаруженные в предыдущих работах авторов и подтвержденные детальным анализом в данной работе.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейший анализ результатов измерений критической частоты слоя  $E$ ,  $foE$ , на ст. Juliusruh, выполненный с учетом небольших неточностей в исходных данных, использованных в предыдущих работах авторов [Данилов и Константинова, 2018б; Danilov and Konstantinova, 2018], позволил подтвердить основные результаты, касающиеся суточных и сезонных вариаций  $k(foE)$ . Рисунок 5 в данной работе качественно идентичен рис. 3 в работе Данилова и Константиновой [2018б] и Fig. 6 в работе [Danilov and Konstantinova, 2018]. Количественные различия малы и на основные выводы указанных работ никак не влияют.

Сравнение данных для станций Juliusruh и Rome, приведенное на рис. 7 показывает, что изменение величины  $\Delta foE$  со временем на этих станциях существенно различно. Изменения  $\Delta foE$  на ст. Rome не регулярны и незначительны по сравнению с соответствующими изменениями на ст. Juliusruh после 1994 г. Сколь-нибудь значимых трендов для ст. Rome получить не удается. Этот факт позволил высказать в предыдущих работах [Данилов и Константинова, 2018б; Danilov and Konstantinova, 2018] предположение о том, что характер поведения трендов  $foF2$  зависит от геомагнитной широты станции и связан с переносом молекул окиси азота из авроральной зоны.

Мы пока не можем ничего добавить к описанной выше гипотезе. Полученные в данной работе для ст. Juliusruh линейные зависимости абсолютной величины  $k(foE)$  от удаленности момента наблюдения от полудня (см. рис. 8) требуют дальнейшего осмысления и, возможно, могут помочь в понимании физических механизмов, ответственных за обнаруженные нами суточные и сезонные вариации трендов  $foE$ .

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, грант № 18-05-80023.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- А.Д. Данилов и А.В. Константинова. Долговременные вариации критической частоты слоя  $E$ , Геомагнетизм и аэрномия 58 (3), 338-347, 2018а
- А.Д. Данилов, А. В. Константинова. Суточные и сезонные вариации трендов критической частоты слоя  $E$ , Геомагнетизм и аэрномия 58 (5), 629-637, 2018б
- D. Danilov and A. V. Konstantinova. Diurnal and Seasonal Variations in Long-Term Changes in the E-layer Critical Frequency, Adv. Space Res. doi: org/1016/j.asr.2018.10.015

### FURTHER ANALYSIS OF $foE$ LONG-TERM TRENDS AT THE JULIUSRUH STATION

A. D. Danilov, A. V. Konstantinova

Further analysis of the vertical sounding data at Juliusruh station made it possible to confirm and specify conclusions obtained in the previous publications of the authors. The presence of the diurnal behavior of the trends in the critical frequency of the ionospheric  $E$  layer,  $foE$ , with a change of the trend sign from positive to negative one at the transition from morning to evening hours and the existence of seasonal variations in this trend is confirmed. The trend increases by the absolute value both for morning and evening hours at the transition from summer months to winter ones. A linear dependence of the absolute value of the trend on the distance in hours from the local noon is found.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, LONG-TERM TRENDS, E-LAYER.