

Численное моделирование аврорального электроджета во время геомагнитной суббури

М.В. Клименко¹, В.В. Клименко², В.В. Брюханов¹

¹ Калининградский государственный технический университет

² Западное отделение ИЗМИРАН, Калининград

Аннотация. Численное моделирование аврорального электроджета во время геомагнитной суббури выполнено на основе модифицированной глобальной самосогласованной модели системы термосфера-ионосфера-протоносфера (ГСМ ТИП). Проведены расчеты влияния усиления во время геомагнитных возмущений продольных токов 1-ой зоны или разности потенциалов через полярные шапки, задаваемых в качестве входных параметров модели, на распределение аврорального электроджета. Получены как квазистационарные решения, так и изменения аврорального электроджета во времени в процессе развития геомагнитного возмущения. Показано, что полученные результаты численных расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными как качественно, так и количественно.

Abstract. Numerical modeling of the auroral electrojet behavior during the geomagnetic substorm has been performed based on the modified Global Self-consistent Model of Thermosphere-Ionosphere-Protonosphere system (GSM TIP). The effect of the enhanced during geomagnetic disturbances Region 1 field aligned currents, as well as the polar cap potential drop difference (which are model inputs), in the auroral electrojet distribution has been calculated. Both quasi-stationary solutions and time evolution of the auroral electrojet during geomagnetic disturbances have been obtained. It has been shown that the simulation results are in a rather good qualitative and quantitative agreement with the observations.

1. Введение

Во время магнитосферных возмущений происходит усиление электрических полей и токов в высокоширотной ионосфере. Эти поля вызывают электромагнитные дрейфы тепловой плазмы в F-области ионосферы, которые приводят к изменению ее плотности. Кроме того, электрические поля и токи проникают из высокоширотной ионосферы на средние и низкие широты. Численному моделированию этих процессов и посвящена настоящая работа.

2. Краткое описание модели

Представлены результаты расчетов, выполненных на модифицированной модели ГСМ ТИП, разработанной в ЗО ИЗМИРАН (*Namgaladze et al.*, 1988). Наряду с традиционными блоками модели, а именно, термосферы, нижней ионосферы, F-области ионосферы, внешней ионосферы и протоносферы, в которых рассчитываются основные параметры околоземной тепловой плазмы, в нее, вместо прежнего блока расчета электрических полей динамо и магнитосферного происхождения, включен новый блок, в котором, помимо пространственного распределения потенциала крупномасштабного электрического поля, рассчитывается также плотность зонального тока в ионосфере. В отличие от старого блока, в котором решение трехмерного уравнения, описывающего закон сохранения плотности полного тока в ионосфере, осуществлялось приведением его к двумерному интегрированием по высоте токопроводящего слоя ионосферы с последующим численным интегрированием полученного уравнения в частных производных эллиптического типа, в новом блоке эта процедура осуществляется вдоль силовых линий геомагнитного поля, лежащих в токопроводящем слое ионосферы.

Расчеты проводились самосогласованным образом для равноденственных условий (22 марта 1987 года) при низкой солнечной активности ($F_{10.7} = 76$).

3. Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 1 показано рассчитанное распределение в северной и южной полярных шапках потенциала электрического поля, генерируемого как магнитосферными источниками, так и ионосферным динамо. В этом варианте задавались продольные токи 1-ой зоны на геомагнитных широтах $\Phi = \pm 75^\circ$, равные $5 \cdot 10^{-8}$ А/м² для спокойных условий (вверху) и $2 \cdot 10^{-7}$ А/м² для возмущенных (внизу) и продольные токи 2-ой зоны на геомагнитных широтах $\Phi = \pm 70^\circ$, равные $3 \cdot 10^{-8}$ А/м² для спокойных условий и $1,2 \cdot 10^{-7}$ А/м² для возмущенных. При этом разность потенциалов через полярную шапку в спокойных условиях составляет 18 кВ в северном полушарии и 12 кВ в южном, а в возмущенных условиях – соответственно 93 кВ и 54 кВ.

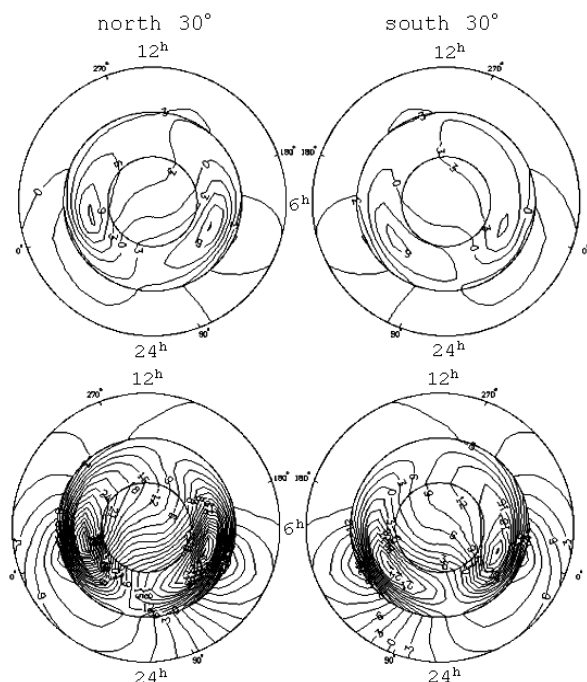


Рис. 1. Распределение потенциала электрического поля в северной (слева) и южной (справа) полярной шапках при заданных продольных токах 1-ой и 2-ой зон в спокойных (вверху) и возмущенных (внизу) условиях

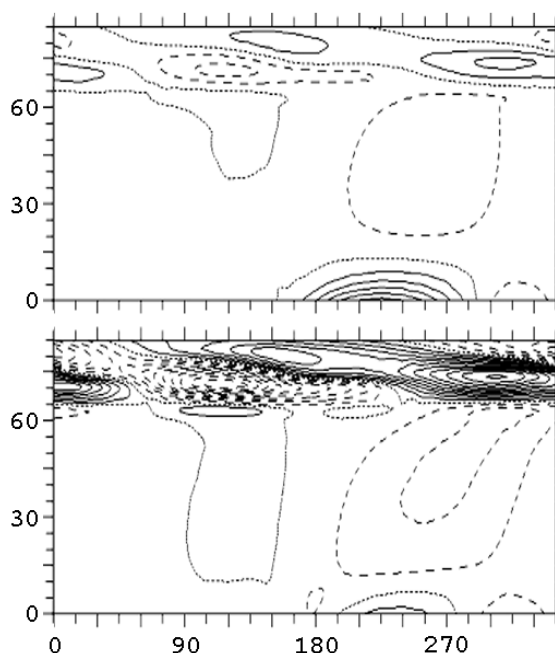


Рис. 2. Распределение линейной плотности зонального тока в спокойных (вверху) и возмущенных (внизу) условиях, соответствующее распределению потенциала, представленному на рис. 1

На рис. 2 показано рассчитанное распределение линейной плотности зонального тока, положительного в восточном направлении, в декартовой геомагнитной системе координат долгота – широта для спокойных (вверху) и возмущенных (внизу) условий, соответствующее распределению потенциала электрического поля, показанному на рис. 1. Сплошными изолиниями здесь и далее показаны положительные токи, штриховыми – отрицательные, пунктирными – нулевые. Шаг между соседними изолиниями 5 А/км. Видно, что в спокойных условиях линейная плотность аврорального электроджета составляет ~10 А/км, восточного экваториального электроджета ~25 А/км и западного ~5 А/км. В возмущенных условиях линейная плотность аврорального электроджета возрастает до ~50 А/км, тогда как плотность восточного экваториального электроджета уменьшается до ~10 А/км при неизменном западном электроджете на экваторе. При этом разрыв Харанга смещается слегка в вечерний сектор. В возмущенных условиях имеет место проникновение восточного тока к экватору в утреннем секторе местного времени и западного из вечернего в дневной, что, по-видимому, и приводит к уменьшению плотности восточного экваториального электроджета в данном варианте расчетов (при заданных продольных токах).

На рис. 3 показано распределение потенциала электрического поля в полярных шапках при заданной на геомагнитных широтах $\Phi = \pm 75^\circ$ разности потенциалов через полярные шапки, равной 40 кВ для спокойных условий (вверху) и 120 кВ для возмущенных (внизу) и заданных на геомагнитных широтах $\Phi = \pm 70^\circ$ продольных токах 2-ой зоны, равных $3 \cdot 10^{-8}$ А/м² для спокойных условий и $2 \cdot 10^{-7}$ А/м² для возмущенных. Видно, что в возмущенных условиях распределение потенциала становится четырехячейковым, в отличие от двухячейкового в спокойных условиях.

На рис. 4 показано распределение в северном полушарии линейной плотности зонального тока для варианта расчета, представленного на рис. 3. Видно, что в спокойных условиях линейная плотность восточного аврорального электроджета составляет ~30 А/км, западного ~10 А/км, восточного экваториального электроджета ~45 А/км и западного ~10 А/км. В возмущенных условиях линейная плотность восточного аврорального электроджета возрастает до ~105 А/км, западного до ~60 А/км, плотность восточного экваториального электроджета возрастает до ~50 А/км, а западного – уменьшается до ~5 А/км. При этом разрыв Харанга, как и в предыдущем случае, смещается слегка в вечерний сектор. В возмущенных условиях имеет место проникновение восточного тока из авроральной зоны к экватору в вечерне-ночном секторе местного времени, что, по-видимому, и приводит к уменьшению плотности западного экваториального электроджета и усилению восточного в данном варианте расчетов (при заданной разности потенциалов через полярные шапки).

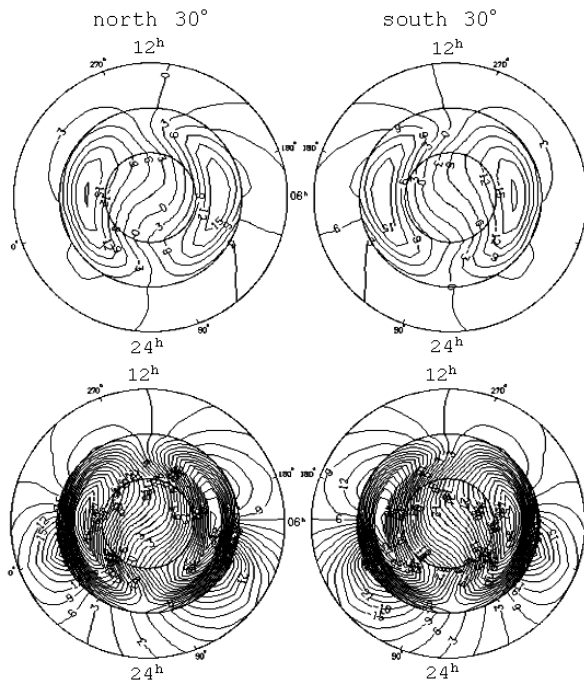


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, при заданных разности потенциалов через полярные шапки и продольных токах 2-ой зоны

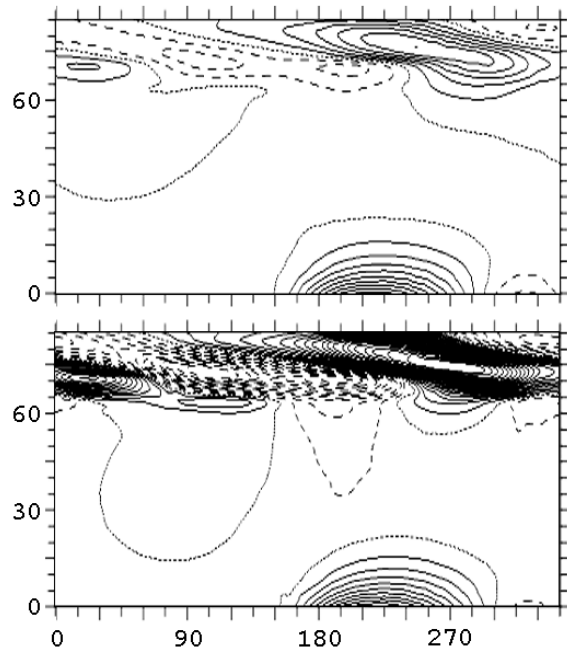


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, соответствующее распределению потенциала, представленному на рис. 3

На рис. 5 показана модель суббури, использовавшаяся в наших расчетах, где изображено изменение по UT разности потенциалов через полярные шапки (сплошной линией) и продольных токов 2-ой зоны (штриховой линией). Фаза роста суббури продолжительностью 30 минут сменяется фазой восстановления. Длительность модельной суббури 4 часа.

На рис. 6 показаны рассчитанные распределения в северном полушарии линейной плотности зонального тока в спокойных условиях (левая панель) и во время суббури (правая панель) с 00.30 до 04.00 UT с шагом 30 мин. (распределение линейной плотности зонального тока в 00.00 UT, то есть в момент начала суббури, показано на рис. 4 сверху). Распределение линейной плотности тока в конце фазы роста практически совпадает с представленным выше на рис. 4 внизу. На фазе восстановления токи в авроральной зоне уменьшаются. При этом в отдельные моменты времени (через 1,5 и 2,5 часа после начала суббури) имеет место ослабление восточного экваториального электроджета. Поскольку основным источником экваториального электроджета является термосферный ветер, то, по-видимому, суббуря генерирует волны в нейтральной атмосфере, приводящие к таким изменениям токов на экваторе.

Следует отметить, что согласно экспериментальным данным (Kamide, 1991) разрыв Харанга, который определяется как граница между восточным и западным авроральными электроджетами или граница между областями с северным и южным электрическим полями во время суббурь сдвигается в вечерний сектор, что согласуется с полученными нами результатами расчетов (рис. 2, 4). Кроме того, во время суббури происходит значительно больший рост западного аврорального электроджета, чем восточного, что связано с ростом проводимости ионосферы во время суббури, наибольшим именно в области западного электроджета. Поскольку в нашей модели суббури отсутствует изменение проводимости ионосферы за счет высыпания высокоэнергичных частиц, мы получили противоположную картину поведения авроральных токов. Отсюда следует важный вывод о том, что для правильного описания электродинамики высокоширотной ионосферы во время суббурь необходимо учитывать высыпания высокоэнергичных частиц в авроральной зоне.

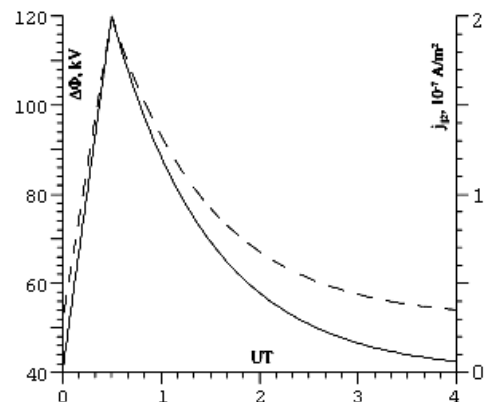


Рис. 5. Развертка по UT разности потенциалов через полярные шапки (слева) и продольных токов 2-ой зоны (справа) во время модельной суббури

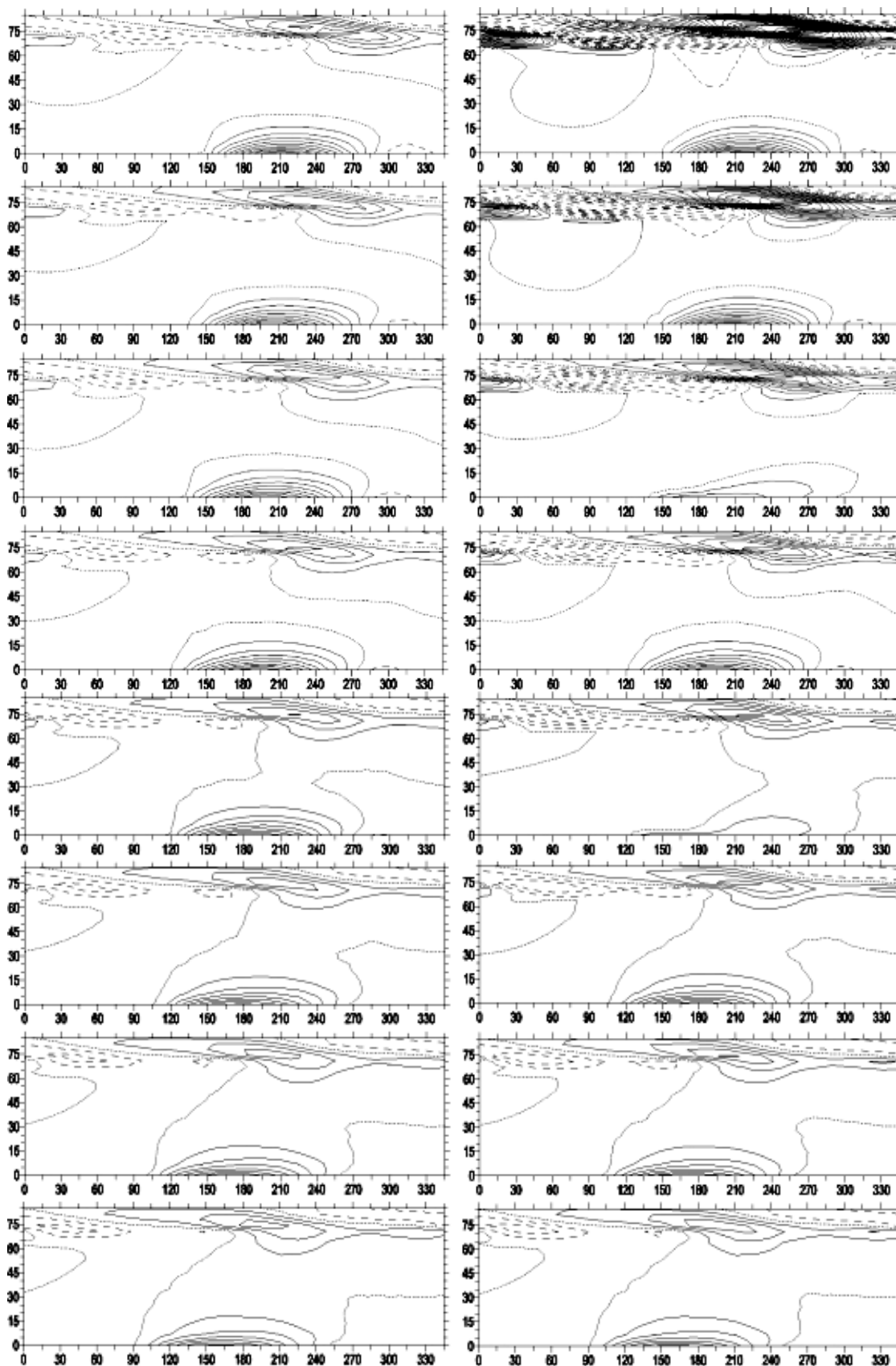


Рис. 6. Рассчитанные распределения линейной плотности зонального тока в северном полушарии в спокойных условиях (слева) и во время суббури (справа) для моментов UT: 00.30, 01.00, 01.30, 02.00, 02.30, 03.00, 03.30 и 04.00 (сверху вниз)

Нами были проведены расчеты всех основных параметров околоземной среды для 19 отдельных станций в обоих полушариях, преимущественно высокоширотных. Наиболее интересные результаты для 8 из них представлены на рис. 7, на котором показаны спокойные (штриховыми линиями) и возмущенные (сплошными линиями) развертки по UT критической частоты F2-слоя ионосферы, foF2, для станций Sondrestrom (Гренландия), Reykjavik (Исландия), EISCAT (Норвегия), Lulea (Швеция), Leningrad (Россия), Kaliningrad (Россия), Jicamarca (Перу) и Scott Base (Антарктида). Видно различие эффектов, вызываемых суббурей на различных станциях. Так, например, на станциях Reykjavik и EISCAT, находящихся во время суббури в утреннем секторе и незначительно отличающихся по геомагнитной широте возмущения имеют разный знак – в Reykjavik отрицательное возмущение, а в EISCAT – положительное. Аналогичная ситуация имеет место на двух среднеширотных станциях, Leningrad и Kaliningrad, отстоящих друг от друга незначительно по геомагнитной широте и находящиеся примерно в одном долготном секторе. На ст. Leningrad модельная суббуря приводит к положительному возмущению foF2, которое через два с небольшим часа после начала суббури сменяется отрицательным, тогда как на ст. Kaliningrad имеет место отрицательное возмущение. На экваториальной станции Jicamarca мы видим небольшое положительное возмущение, а на антарктической станции Scott Base отрицательное возмущение сменяется положительным, которое затем переходит в отрицательное. Для объяснения этих эффектов суббури в foF2 недостаточно привлекать локальные процессы, а следует рассматривать пространственно-временное распределение всех параметров околоземной плазмы.

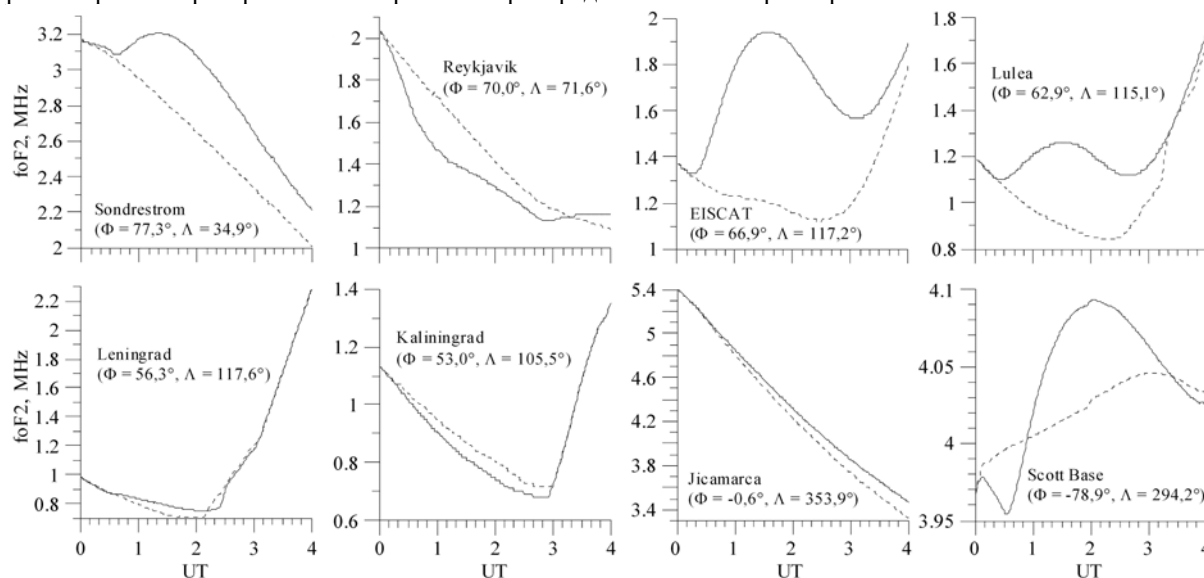


Рис. 7. Рассчитанные развертки по UT критической частоты F2-слоя ионосферы, foF2, в спокойных условиях (пунктирные кривые) и во время суббури (сплошные кривые) для различных станций

4. Заключение

Таким образом, показано, что данная модель в состоянии описывать распределение потенциала электрического поля и токов в ионосфере Земли как в спокойных условиях, так и во время возмущений. Результаты проведенных расчетов указывают на то, что во время возмущений токи в авроральной ионосфере оказывают влияние на экваториальный электроджет. Отмечается также, что для корректного описания вариаций токов во время суббурь необходимо обязательно учитывать высыпания авроральных высокоэнергичных частиц.

Литература

- Kamide Y.** The auroral electrojets: Relative importance of ionospheric conductivities and electric fields. *Auroral Physics*, Ed. C.-I. Meng, M.J. Rycroft and L.A. Frank, p.385-399, 1991.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M.** Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure and Appl. Geophys. (PAGEOPH)*, v.127, N 2/3, p.219-254, 1988.