

ИОНОСФЕРНЫЕ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЗРЫВОВ МЕТЕОРОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

ЧЕРНЯКОВ С.М.

*ПГИ, г. Мурманск, Россия,
smcherniakov@gmail.com*

Двадцать вторая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"
11 - 15 ноября 2024 г.
Институт космических исследований РАН, Москва

В месте взрыва метеора создается повышенное давление газа на порядок и более превосходящее давление в окружающей среде. За счет этого появляется ударно-акустическая волна (УАВ) [Афраймович и др., 2002] со значительной начальной амплитудой, которая распространяется со скоростью, превышающей скорость звука на ионосферных высотах. Во время взрыва также возникают акустические и акустико-гравитационные (АГВ) волны. Как правило, УАВ в процессе распространения ослабевает, генерируя при этом акустические, АГВ и медленные магнитогидродинамические (ММГД) волны, которые оказывают влияние на ионизованную часть атмосферы. Ударные волны при своем распространении относительно быстро ослабевают, но при распространении в ионосфере они вызывают, например, появление плазменно-акустических волн [Wickersham, 1966], которые могут распространяться с большой скоростью (1.3-2.2 км/с), ударных МГД волн [Ландау, Лившиц, 2016] или ударно-акустических волн [Афраймович и др., 2002].

Wickersham, A.F., Jr, Identification of Acoustic-Gravity Wave Modes from Ionospheric Range-Time Observations // J. Geophys. Res. 71(19), 4551-4555 (1966).

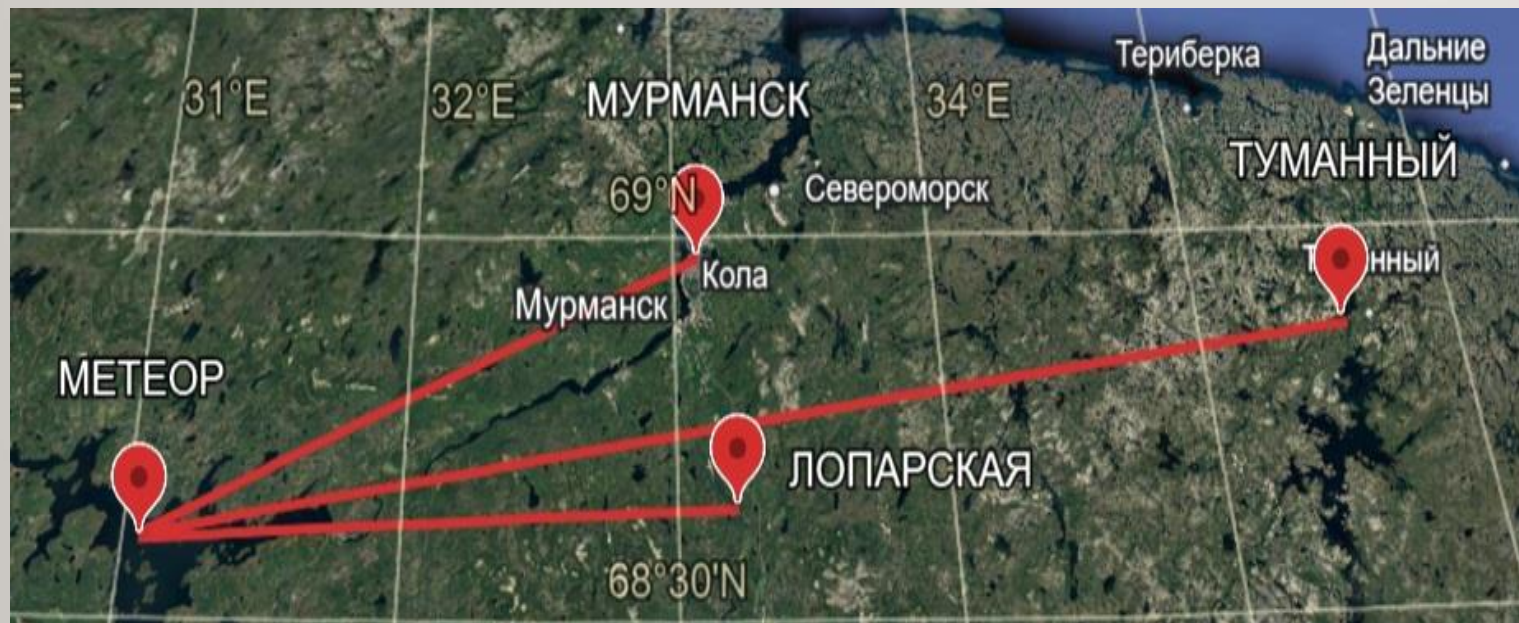
Афраймович, Э.Л., Перевалова, Н.П., Плотников А.В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэрономия. 42(6), 790-797 (2002)

Ландау, Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики. Т. 8. М.: Физматлит, 2016. 656 с.

Взрыв метеора 19 декабря 2014 г.

19 декабря 2014 г. камерами всего неба в пос. Верхнетуломский (68.6 с.ш., 31.7 в.д.) и г.Апатиты (67.6 с.ш., 33.4 в.д.) был зафиксирован след падения метеора, разрушение которого над Верхнетуломским водохранилищем в 19:03:07 UT сопровождалось яркой вспышкой.

На рисунке показано место взрыва метеора (68.6 с.ш., 31.1 в.д.), положение обсерватории «Лопарская» ПГИ (68.2 с.ш., 33.0 в.д.) (расстояние от места взрыва до обсерватории около 90км), приемника ГНСС в Мурманске (68.9 с.ш., 33.0 в.д.) (90 км) и радиофизического полигона «Туманный» ПГИ (69.0 с.ш., 35.7 в.д.) (190 км), по данным которых оценивалась реакция геомагнитного поля и ионосферы.



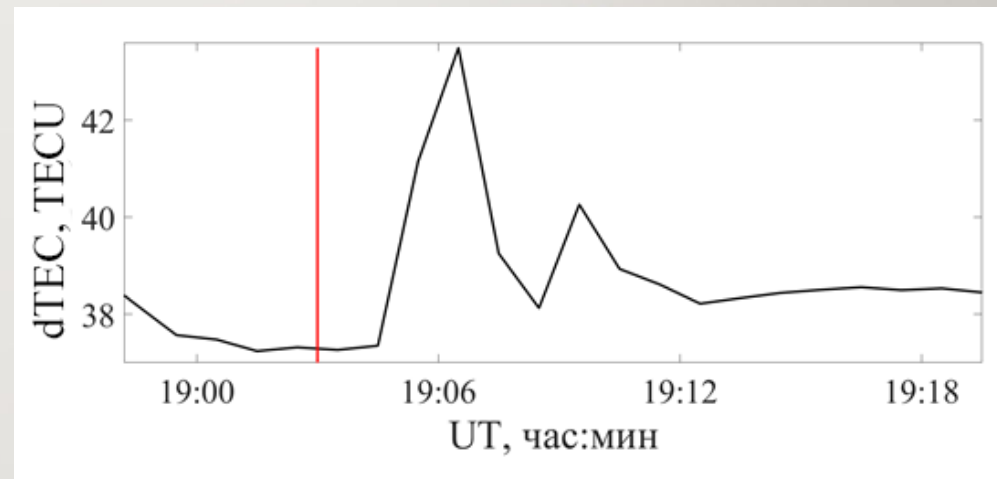
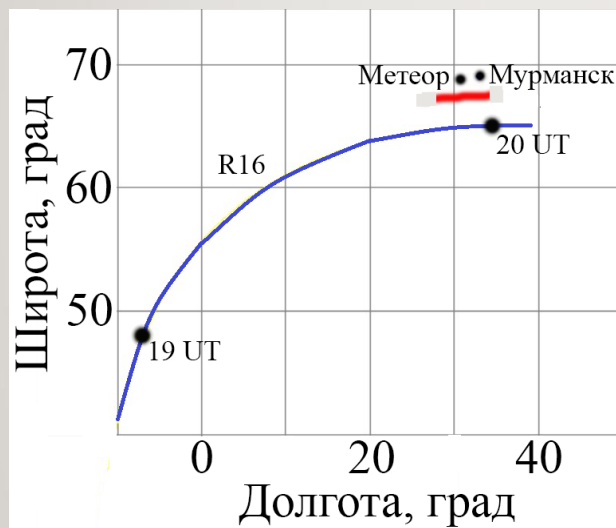
Геомагнитная обстановка во время взрыва была спокойной.

2014/12/19

Планетарный индекс Кр

3- 2- 2+ 1+ 1 2+ 2 2

Ионосферные эффекты по данным спутников ГЛОНАСС



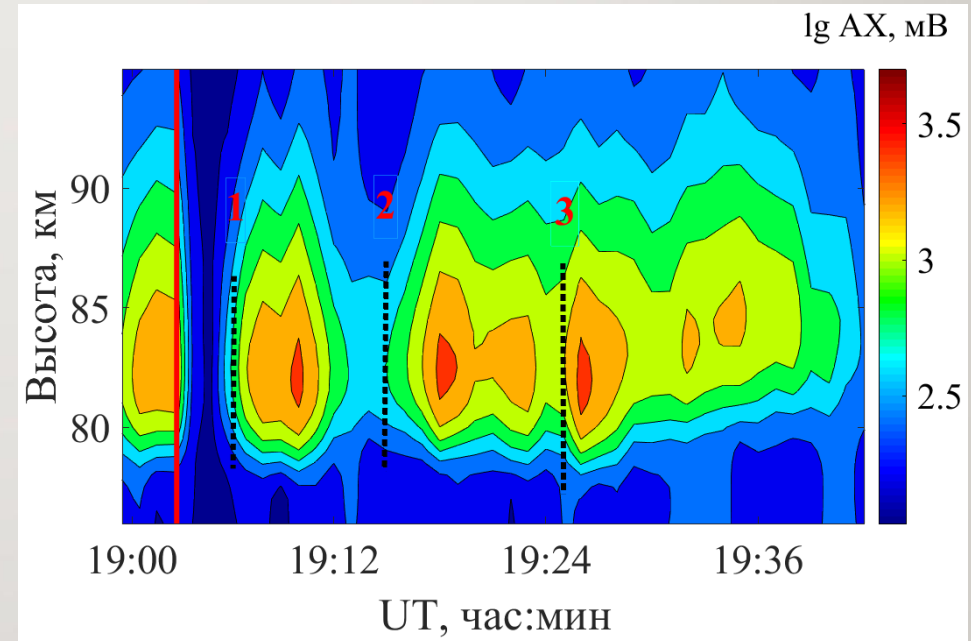
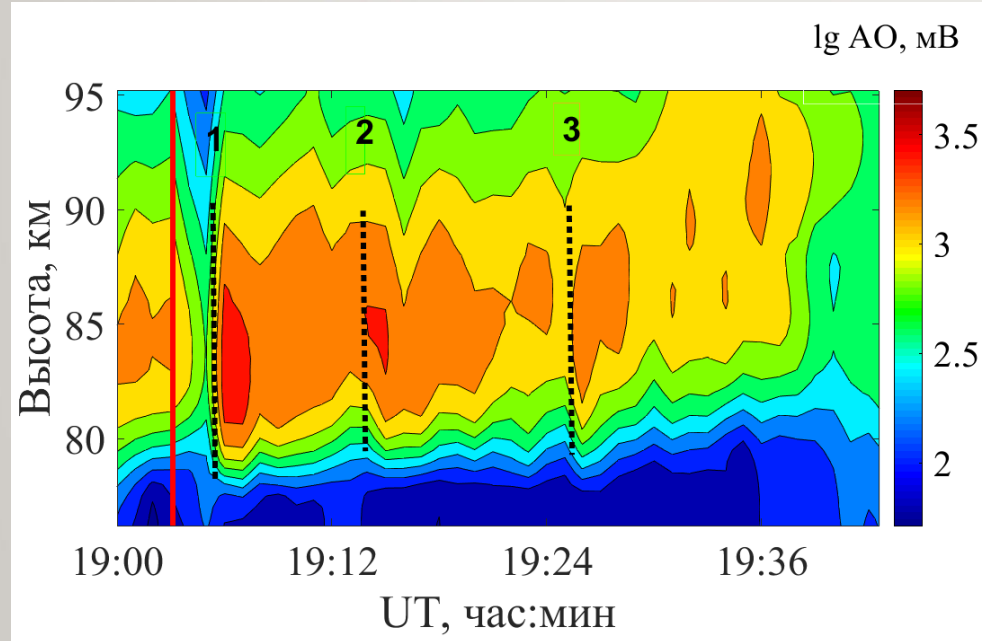
Траектория спутника ГЛОНАСС R16 в географических координатах. 19 UT и 20 UT показывают положение спутника в это время. Точка Метеор указывает место взрыва метеора. Красная линия – положение ионосферных точек на высоте 400 км.

Вариации полного электронного содержания во время взрыва метеора. $1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$. Предположительно, первый пик в вариациях связан с появлением ударной волны, второй – акустико-гравитационных волн.

Ионосферные эффекты в нижней ионосфере

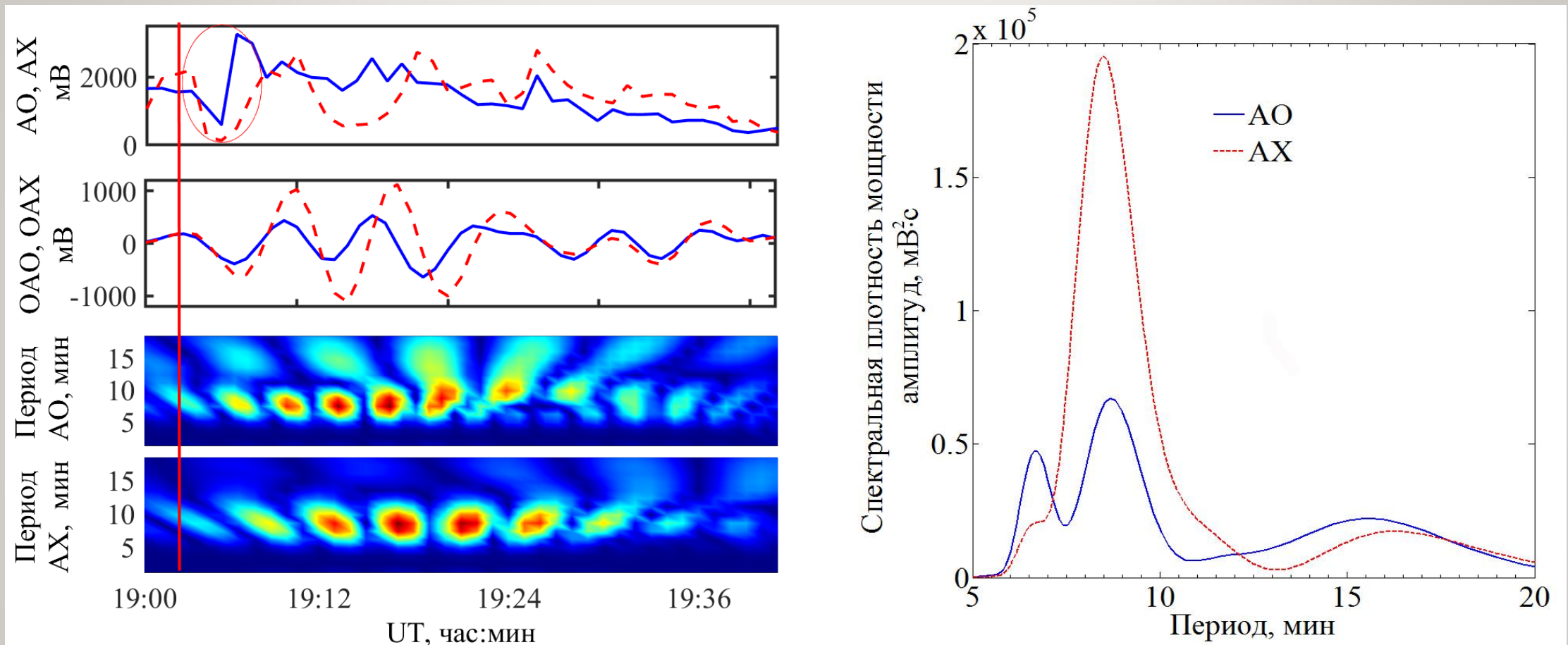
Основные параметры установки частичных отражений и методика обработки сигналов приведены в работе [Терещенко и др., 2003].

Терещенко В. Д. и др. Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы // Техника и методика геофизического эксперимента. Апатиты : КНЦ РАН, 2003. С. 37–46.



На рисунках представлено двумерное распределение амплитуд обыкновенной (слева) и необыкновенной (справа) волн. Вертикальные штриховые линии показывают время прихода первого возмущения (ударная волна) (1) (1600 м/с), АГВ (2) (290 м/с) и ММГД (3) (140 м/с) [Терещенко и др., 2014] волн.

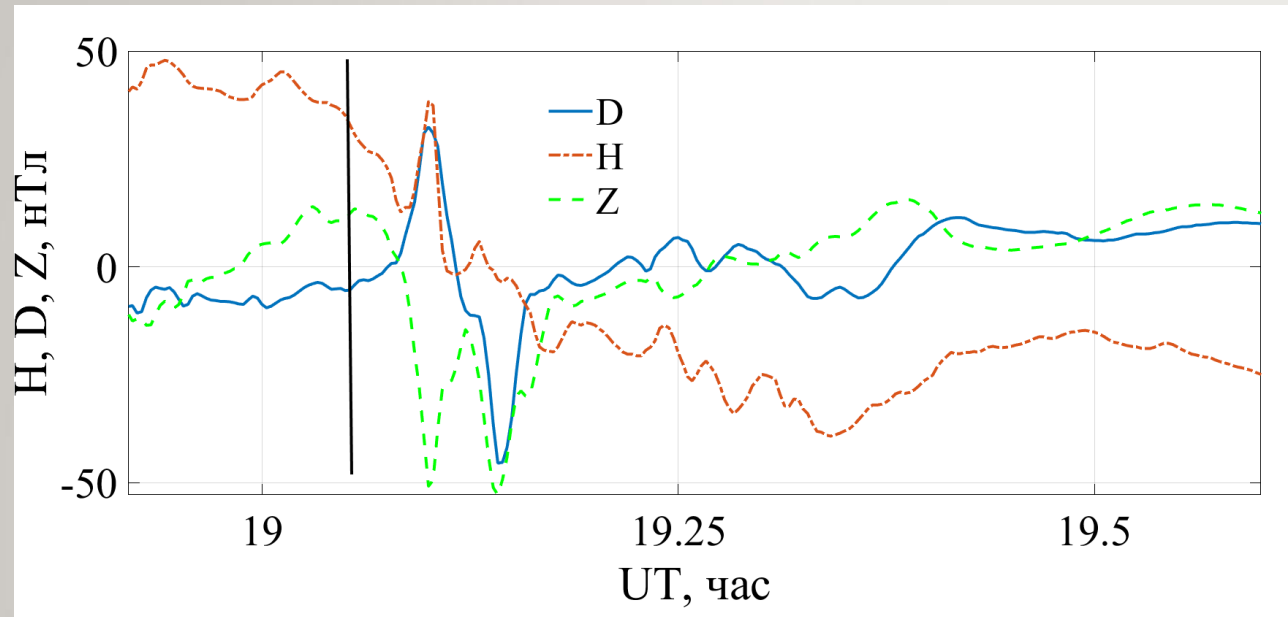
Терещенко В.Д., Васильев Е.Б., Терещенко В.А., Оглоблина О.Ф., Черняков С.М. Волновые возмущения в нижней полярной ионосфере во время падения Челябинского метеорита // Proc. of the 37th Annual Seminar on Physics auroral phenomena, Apatity, Russia, 25–28 February 2014. Apatity: KSC RAS, PGI, 2014. P. 104-107.



На рисунке (слева, верхний рисунок сверху) представлены амплитуды обыкновенной (АО) (сплошная синяя линия) и необыкновенной (АХ) (штриховая красная линия) волн, частично отраженных от высоты 83 км. Вертикальная красная линия – момент взрыва метеора. Для получения волновых характеристик отраженного сигнала использовался эллиптический полосовой фильтр Кауэра с периодами от 2 до 20 минут. На рисунке (слева, второй рисунок) приведены графики отфильтрованных амплитуд. На рисунке (слева, третий, четвертый) представлены вейвлет-спектры АО и АХ амплитуд. Для их расчета использовался вейвлет Морле. На рисунке (справа) приведены спектральные плотности мощности амплитуд обыкновенной (6.6 мин и 8.7 мин) и необыкновенной (8.5 мин) волн.

Геомагнитные эффекты падения метеора

Геомагнитное поле является индикатором многих процессов, происходящих на Земле и в окружающем пространстве. Вариации геомагнитного поля представляют собой наложение различных возмущений геомагнитного поля. Их идентификация представляет порой достаточно сложную задачу. Задача облегчается, если известны параметры явления, вызвавшего возмущение (место, характеристики и т.д.). Все это также относится к влетающим в земную атмосферу метеороидам, полет которых сопровождается различными процессами: нагревом и разрушением метеороида, генерацией различных типов волн, а также возмущениями геомагнитного поля. Несмотря на то, что наблюдение и анализ изменений параметров геомагнитного поля является простым и эффективным методом исследования процессов, сопровождающих падение небесных тел, тем не менее, эффект влияния на геомагнитное поле пролетов и разрушение метеороидов изучен недостаточно. Предложены различные механизмы воздействия метеороидов на геомагнитное поле.

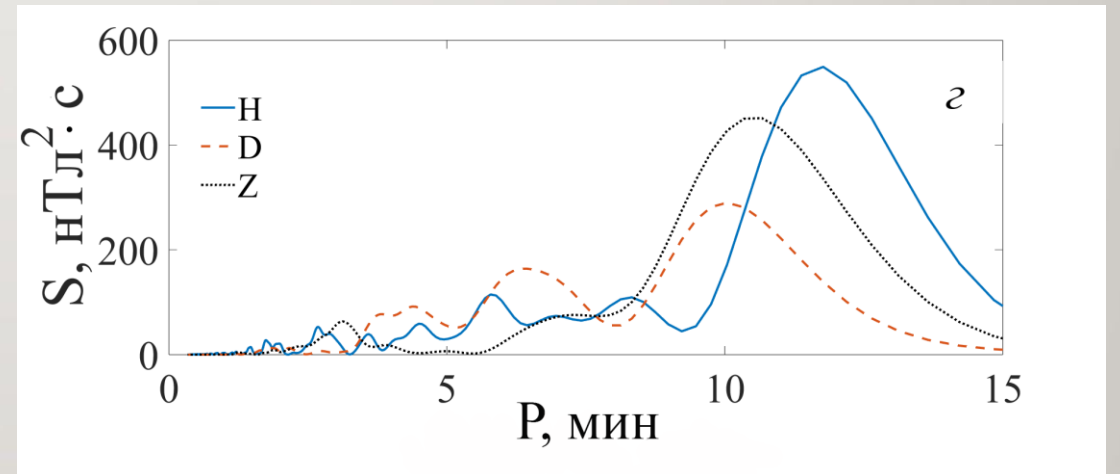
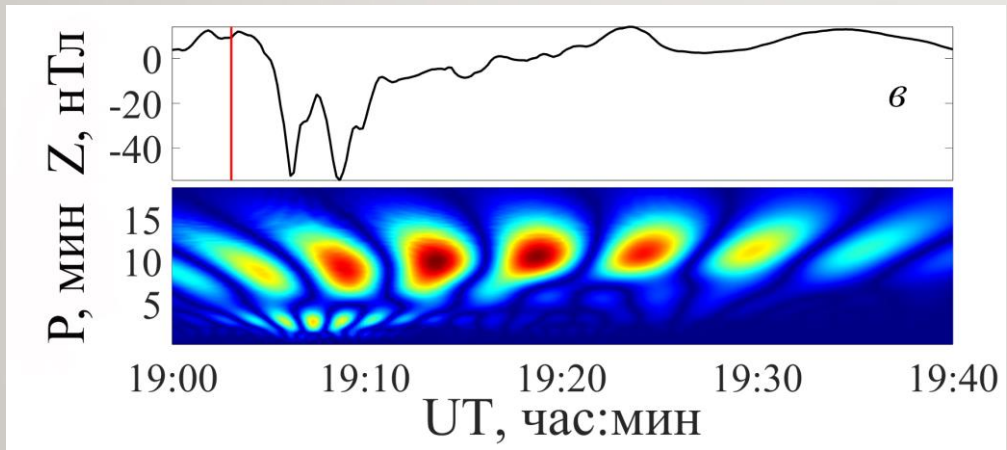
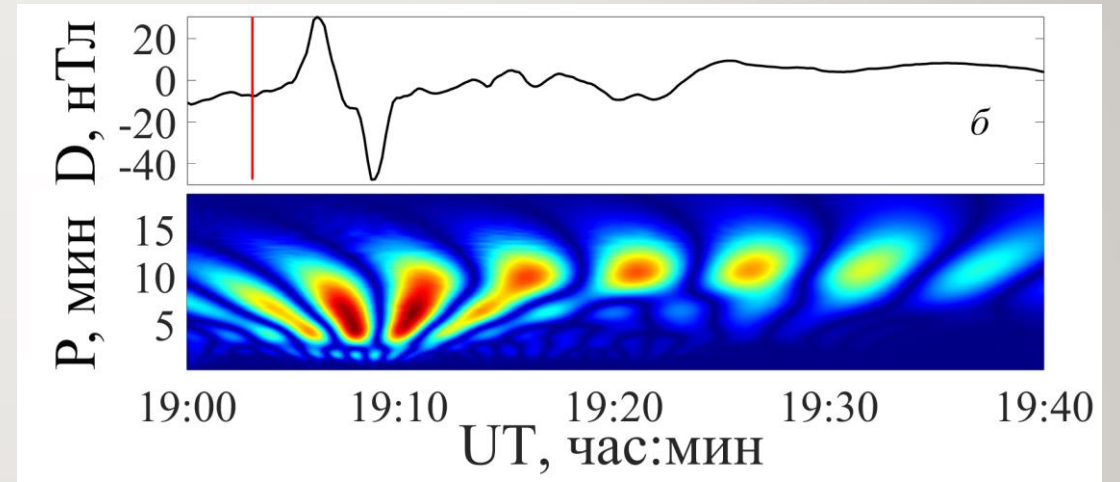
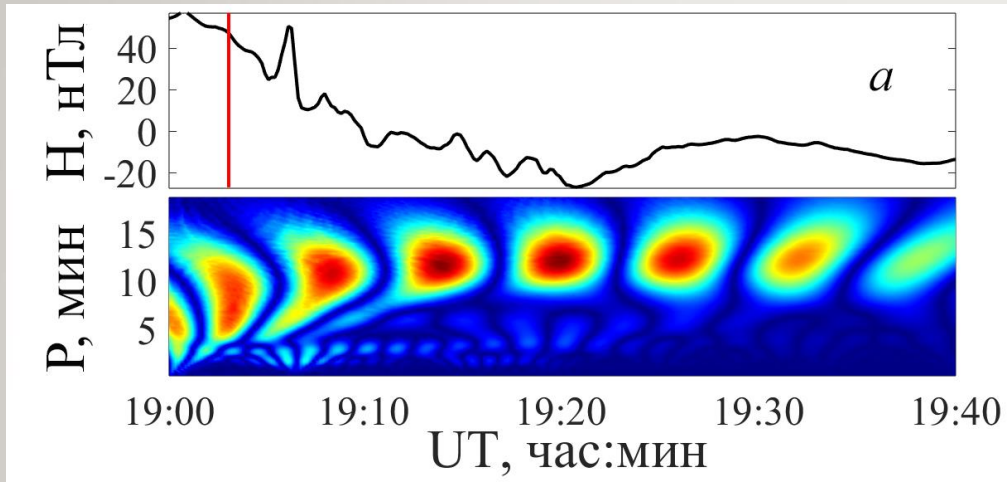


Вариации геомагнитного поля во время взрыва метеора, зарегистрированные в обсерватории «Лопарская» 19 декабря 2014 г.

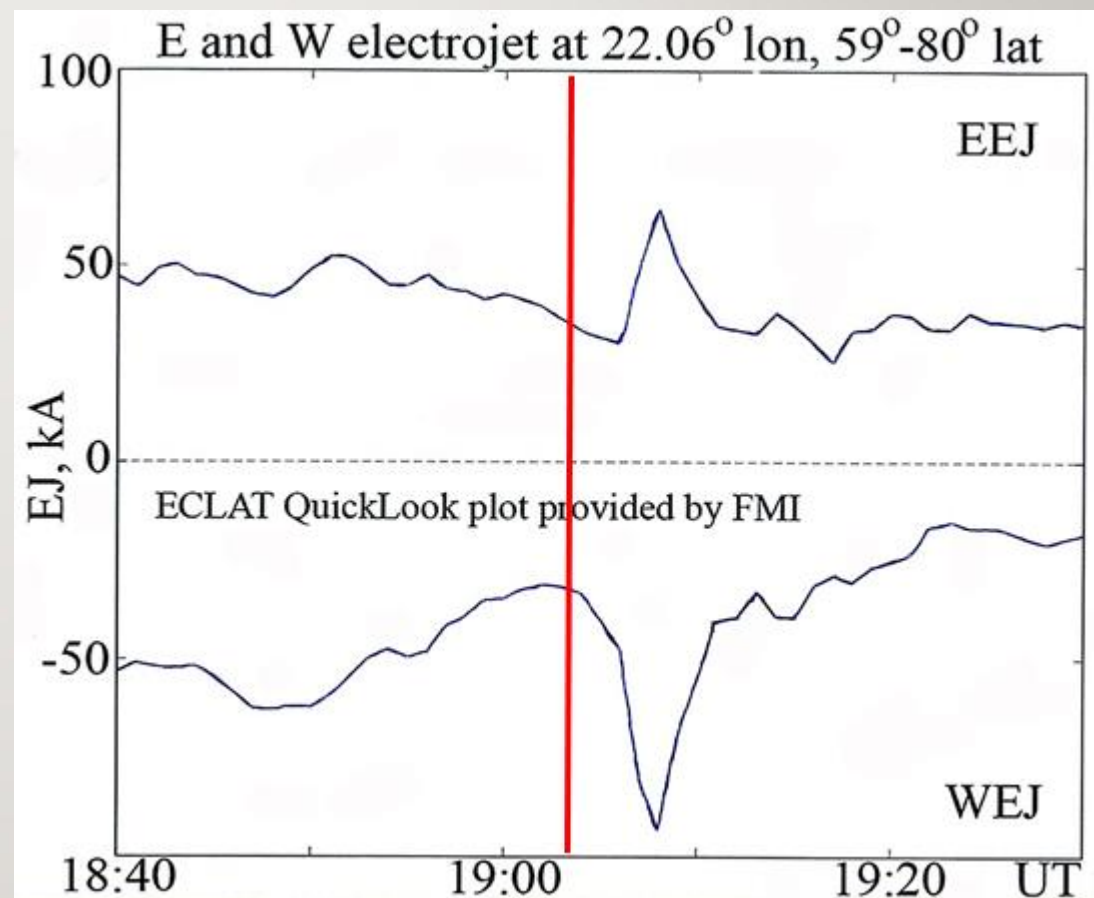
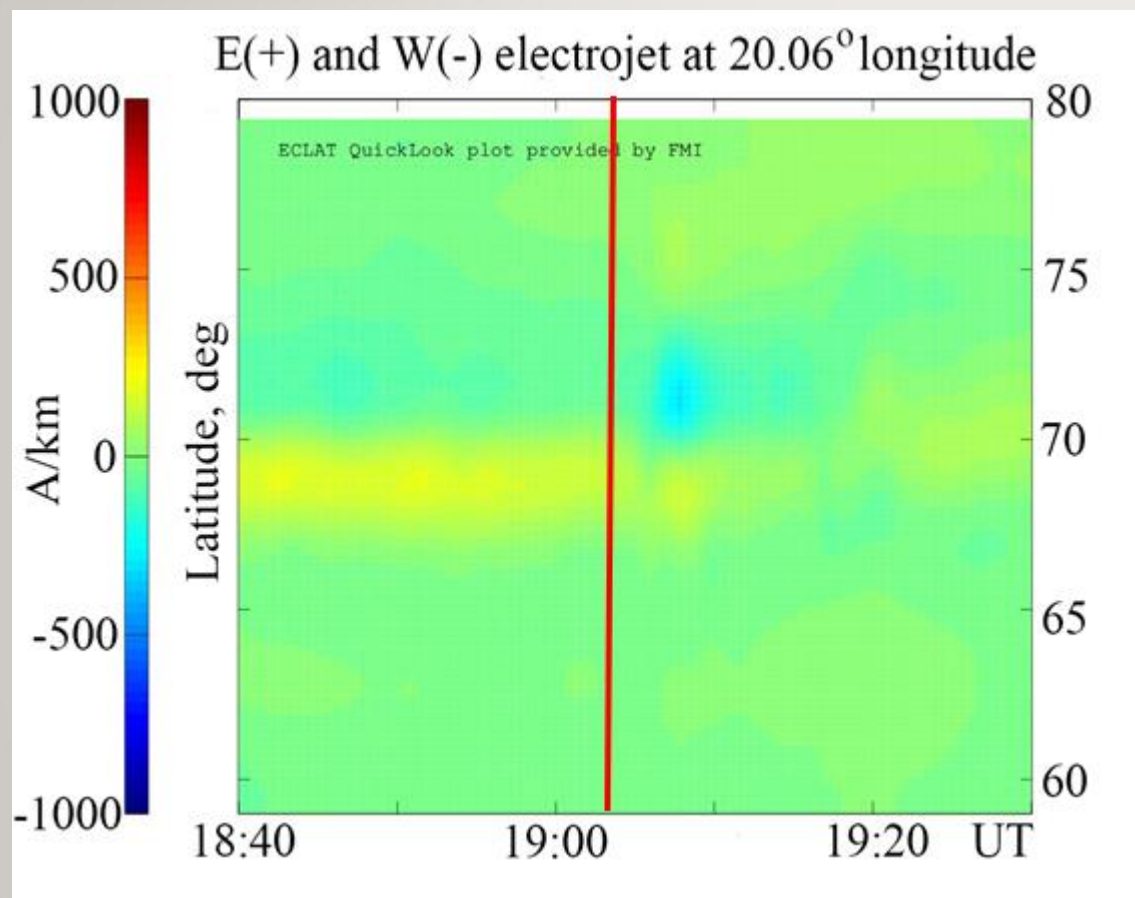
Приблизительно через 110 с после вспышки метеора во всех компонентах было отмечено их резкое изменение. При этом характер этих измерений был различным: в H-компоненте – острый пик, в D-компоненте – N-образное изменение, которое в ионосферных исследованиях связывают с прохождением ударной волны через ионосферу, в Z-компоненте видно W-образное изменение. Общее изменение в H-компоненте было около 40 нТл, в Z-компоненте - около 60 нТл, в D-компоненте – около 80 нТл.

После импульсных изменений компонент поля заметны их волнообразные изменения с амплитудой в несколько нТл. Иванов [1961] предположил, что возмущения геомагнитного поля вызваны движением волн, сгенерированных в атмосфере падающим космическим телом, которые модулировали ионосферный ток на высотах динамо-области.

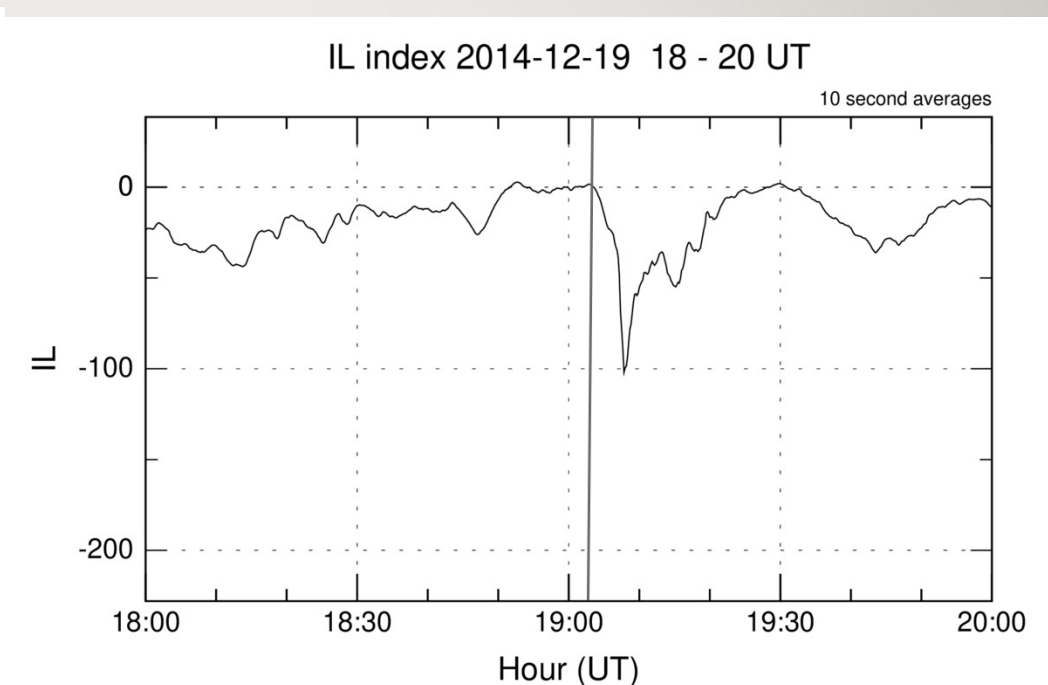
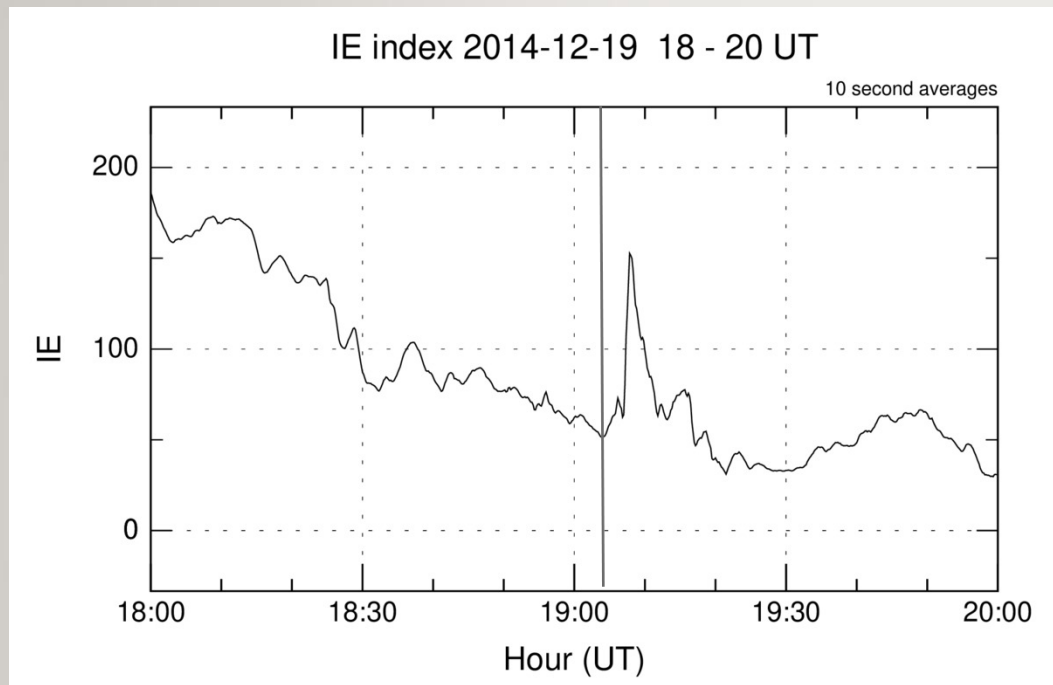
Иванов, К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1, № 4. С. 616-618.



На рисунках представлены вариации компонент геомагнитного поля, зарегистрированных в обсерватории «Лопарская»: H, D, Z и соответствующие им спектральные плотности мощности. Компоненты обозначены по осям ординат. Внизу по оси абсцисс показано время в UT. На рисунках вертикальной линией показано время взрыва метеора.



Рисунки сформированы на странице Финского Метеорологического института
<https://space.fmi.fi/MIRACLE/>

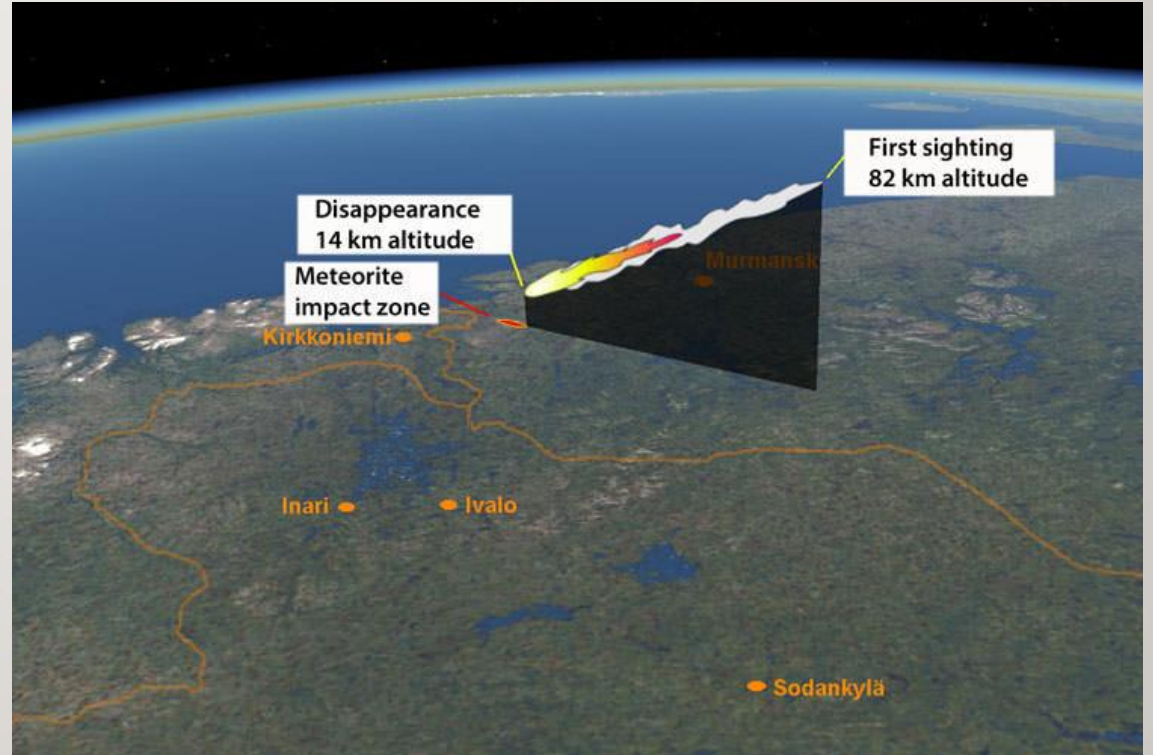


Если принять высоту взрыва в 20 км, то общее расстояние от места взрыва до токовой струи [Зайцев и др., 2022] можно оценить в 95 км. В этом случае скорость распространения воздействия от взрыва метеора на токовую струю при времени реакции 110 с равна приблизительно 860 м/с. Подобные скорости соответствуют скоростям распространения ударных волн.

Т.о., импульсный характер реакции геомагнитного поля на взрыв метеора можно объяснить реакцией авроральных электроджетов на прохождение ударной волны. Волнообразные изменения компонент возможно связаны с модуляцией ионосферных токов в динамо-области акустическими и акустико-гравитационными волнами.

Пролет метеора 18 апреля 2014 г.

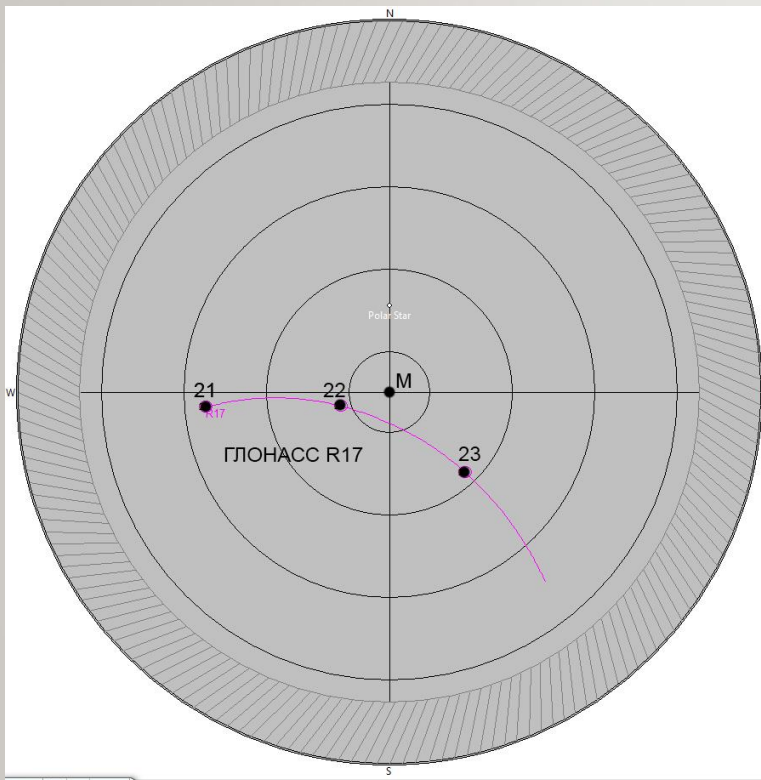
Жители севера Кольского полуострова, Норвегии и Северной Финляндии 18 апреля 2014 г. наблюдали вблизи российско-норвежской границы пролет и взрыв в 22:14 UT яркого метеора.



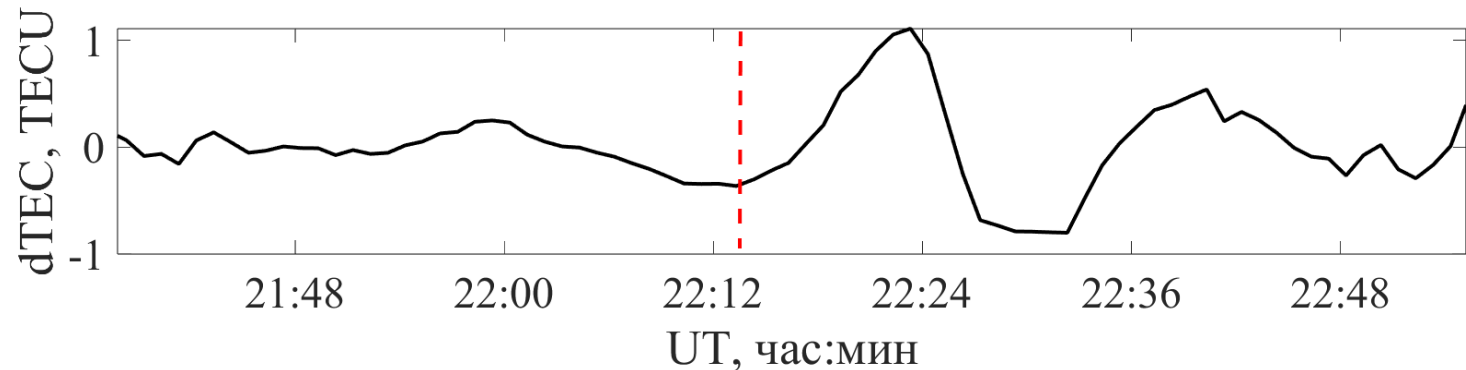
Траектория метеора была смоделирована Еско Лютиненом из группы финской сети наблюдений за метеорами в Урса (Esko Lyytinen, the Ursa Finnish Fireball Network) (<http://www.universetoday.com/112907/eureka-kola-fireball-meteorites-found-in-russia/>)

Ионосферный эффект

Вариации полного электронного содержания получены по данным спутника ГЛОНАСС.



Date: 18.04.2014
UTC Time: 21:00:00 - 23:59:00
Current UTC Time: 21:00:00
Lat: 68°56'53
Lon: 33°03'48
El. Height: 0.00 m



Вариации полного электронного содержания во время взрыва метеора. 1 TECU = 10^{16} м⁻². Предположительно первый пик в вариациях связан с воздействием ударной волны, второй – акустико-гравитационных волн.

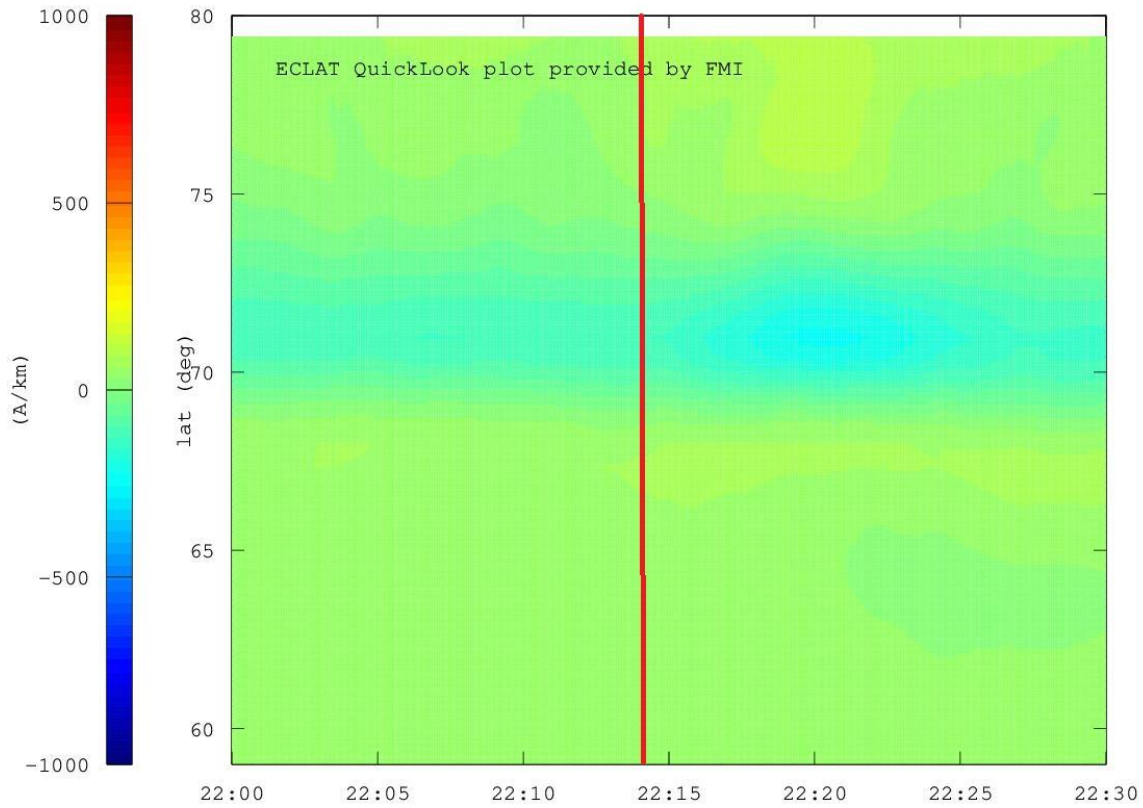
Приемная точка расположена в г. Мурманске (М). Траектория спутника нарисована в системе азимут-угол места.

2014/04/18

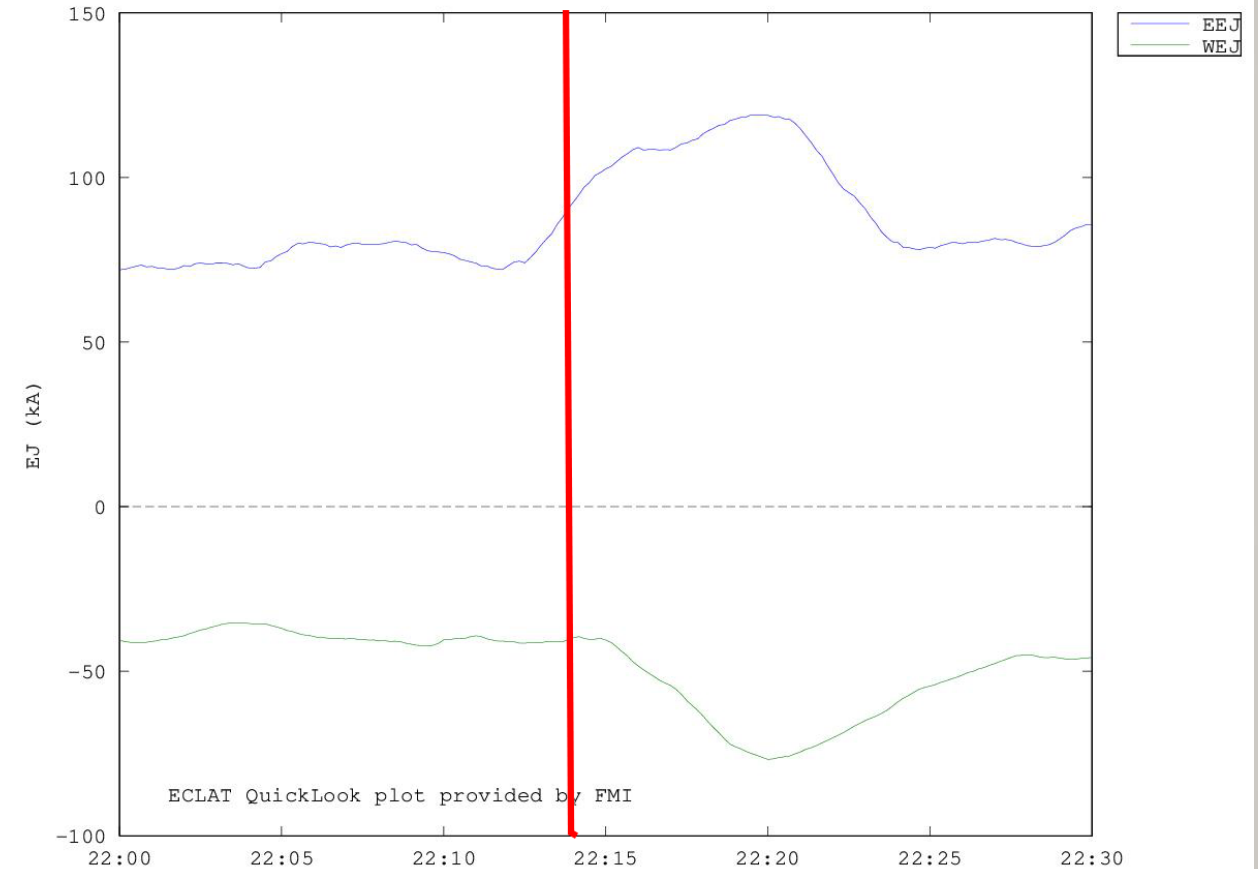
Планетарный индекс Кр
2- 2- 1- 1+ 2 1+ 2- 3-

Геомагнитный эффект

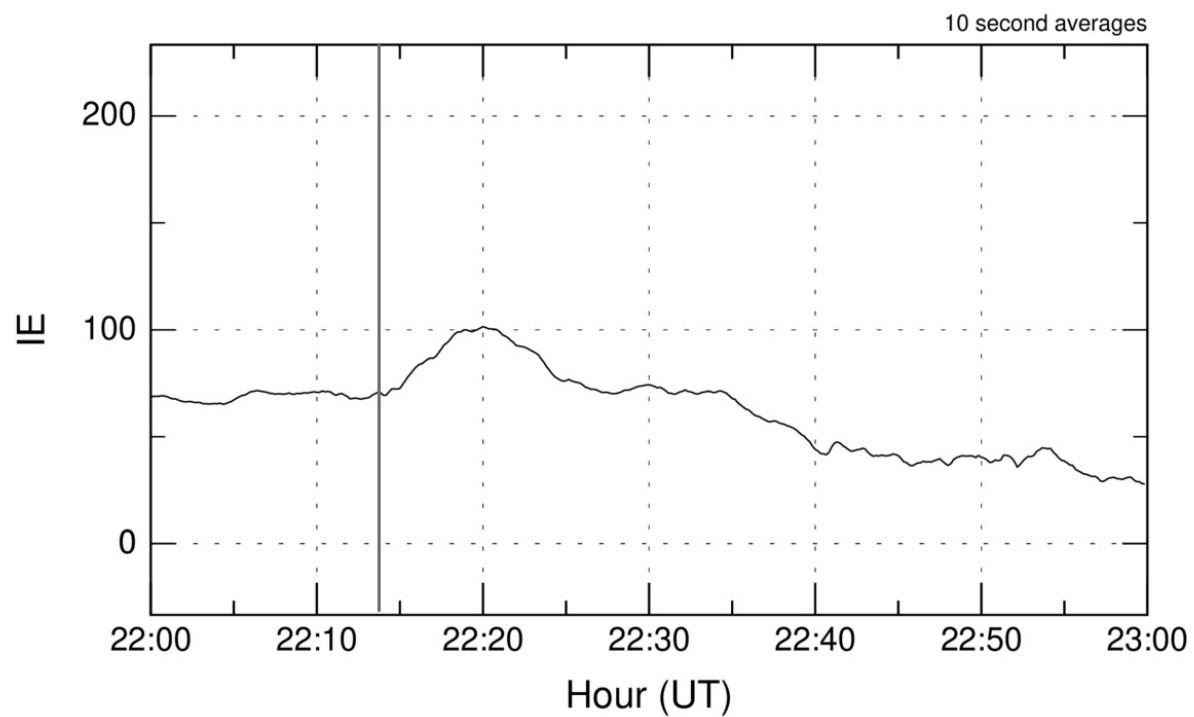
E(+) and W(-) electrojet at 22.06° lon, 18 Apr 2014



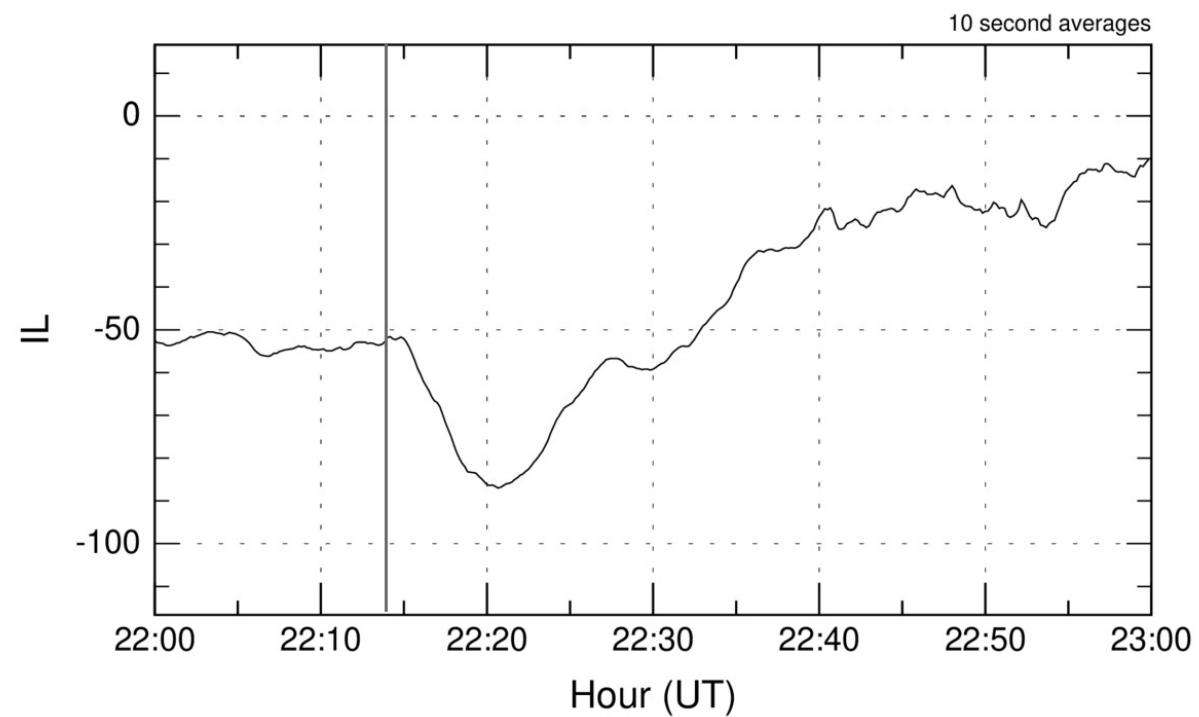
E and W electrojet at 22.06° lon, 59°-80° lat; 18 Apr 2014



IE index 2014-04-18 22 - 23 UT

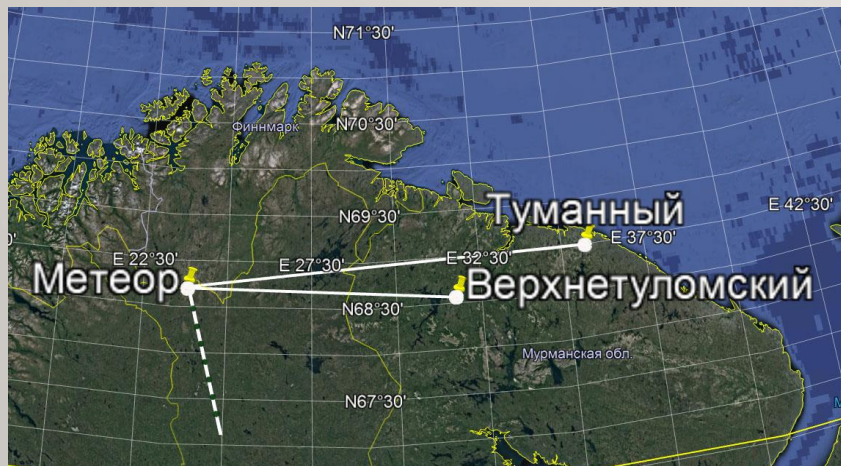
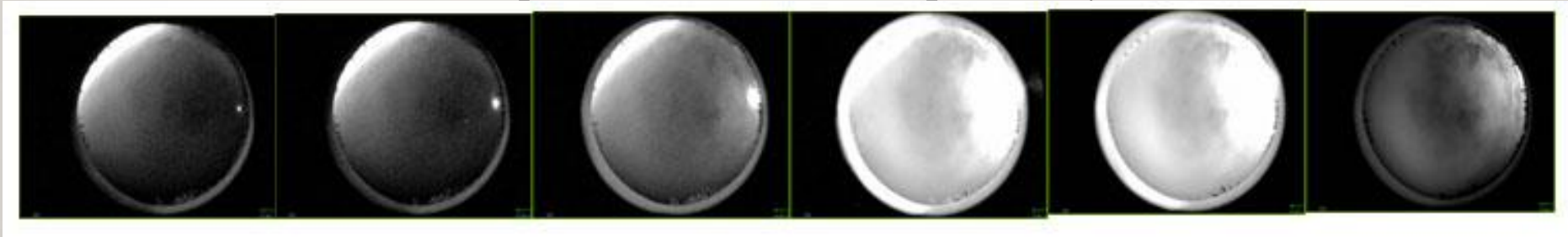


IL index 2014-04-18 22 - 23 UT



Пролет метеора 16 ноября 2017 г.

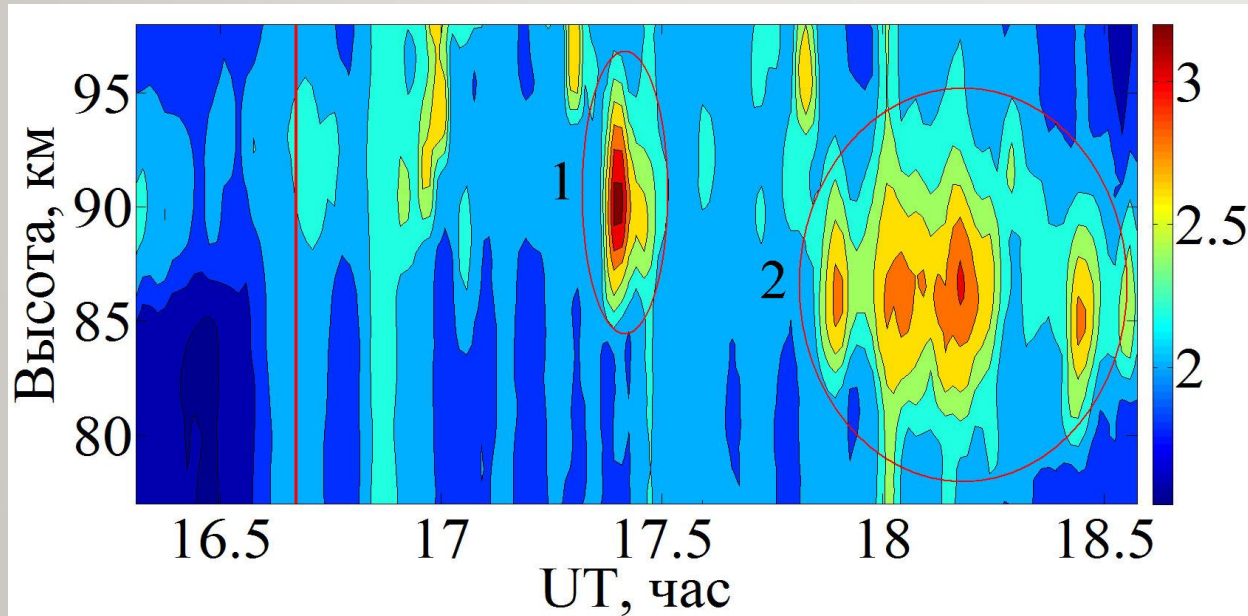
Мощный взрыв метеора произошел 16 ноября 2017 г. в 16:40:20 UT над Северной Финляндией (68.7 с.ш., 23.8 в.д.). На рис.1 представлены последовательные кадры (экспозиция ~1 с) пролёта метеора, зафиксированные камерой всего неба на р.ф.п. «Верхнетуломский». Метеор вторгся в плотные слои атмосферы примерно в 16:40:15 UT, его видимый пролёт продолжался около четырёх секунд при значительном увеличении яркости свечения вследствие быстрого разогрева метеорного вещества. На четвёртой и пятой секундах регистрации наблюдалась осветившая весь небосвод яркая вспышка, вызванная взрывным разрушением метеора, при этом, наблюдалось увеличение яркости рассеянного света в области зенита более чем в 40 раз по отношению к фоновому свечению ночного неба.



Реакция ионосферы на этот взрыв наблюдалась на радаре частичных отражений на р.ф.п. «Туманный» (рис. 1). Белая штриховая линия, идущая с юга к месту взрыва метеора, указывает направление движения метеора к месту взрыва. Расстояние от места взрыва до р.ф.п. «Туманный» равно приблизительно 480 км.

Ионосферный эффект

На рис. приведено двумерное распределение амплитуды обыкновенной волны, полученное по данным радара частичных отражений на временном интервале от 16:20 UT до 19:00 UT, включающем момент взрыва метеора (вертикальная линия). Эллипсами выделены участки возмущений в амплитуде, появившиеся после взрыва метеора. Цифры обозначают номер возмущения.



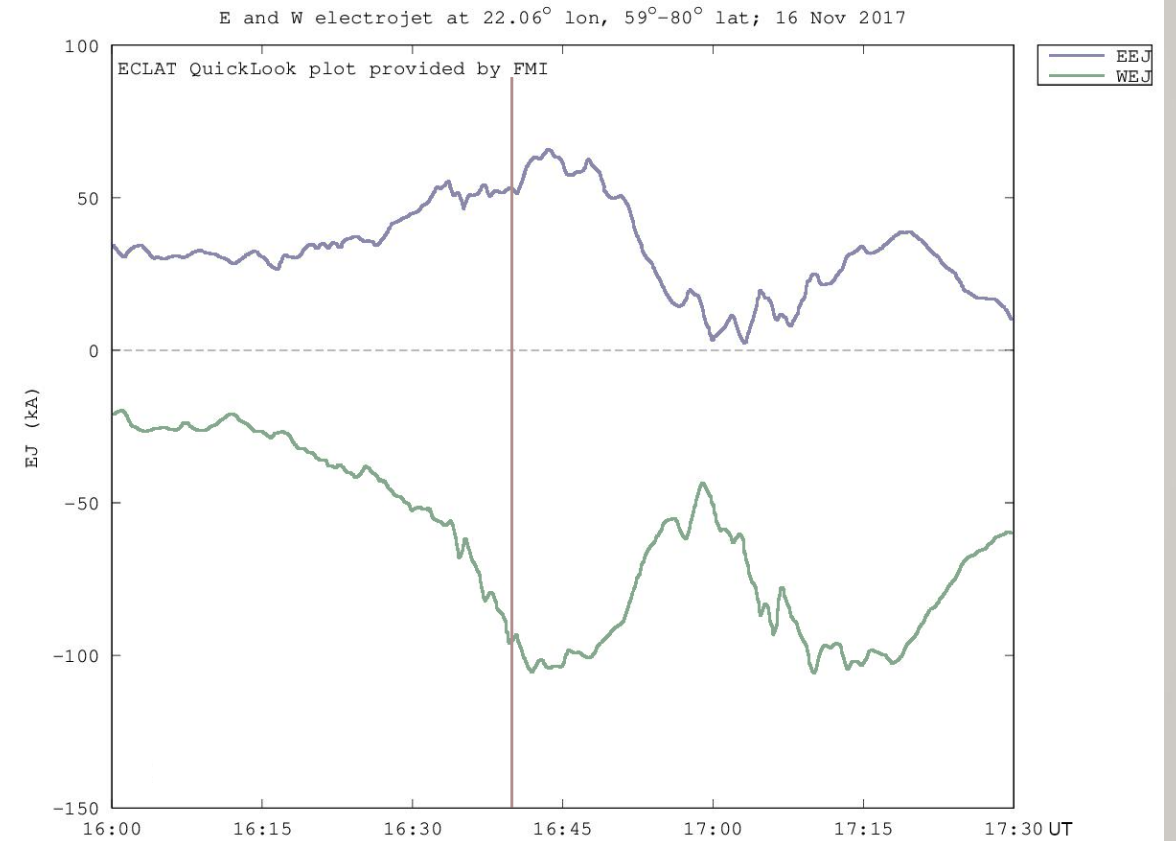
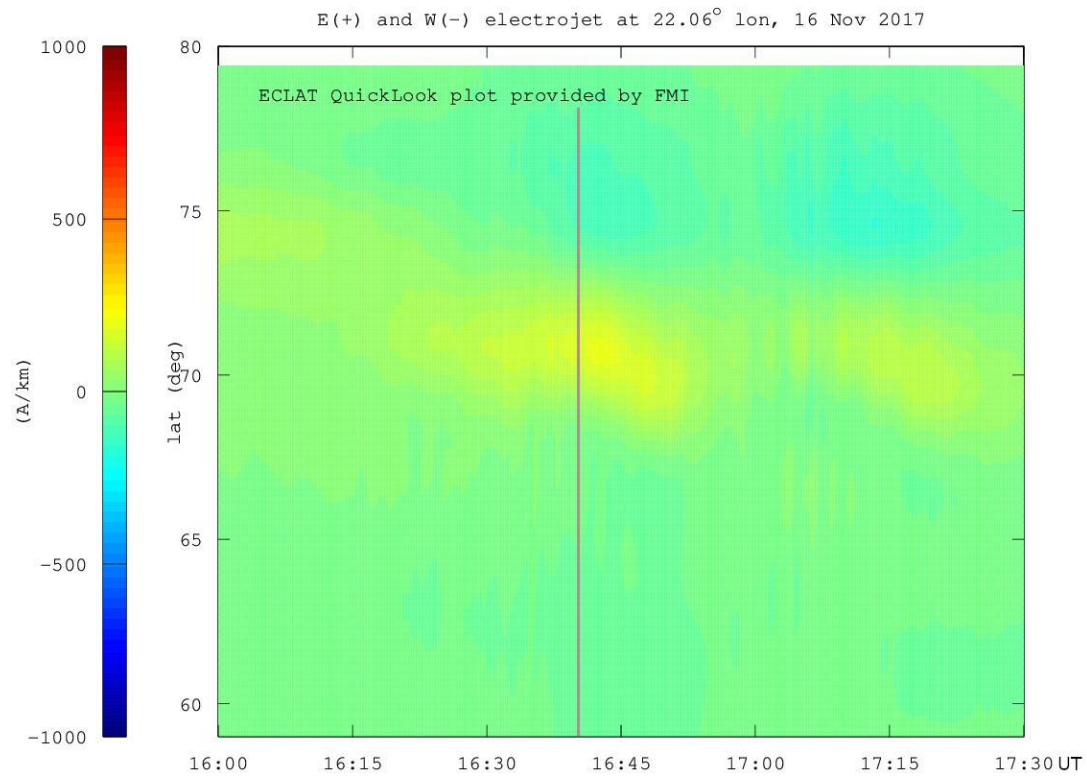
Если предположить, что возмущения вызваны взрывом метеора, то скорость распространения первого возмущения равна приблизительно 210 м/с, а второго – 115 м/с. Первое наблюдаемое возмущение можно объяснить приходом акустико-гравитационных волн. Второе возмущение имеет вид пакета волн и по скорости соответствует приходу медленных МГД волн, сгенерированных при взрыве метеора [Терещенко и др., 2014].

2017/11/16

Планетарный индекс Кр

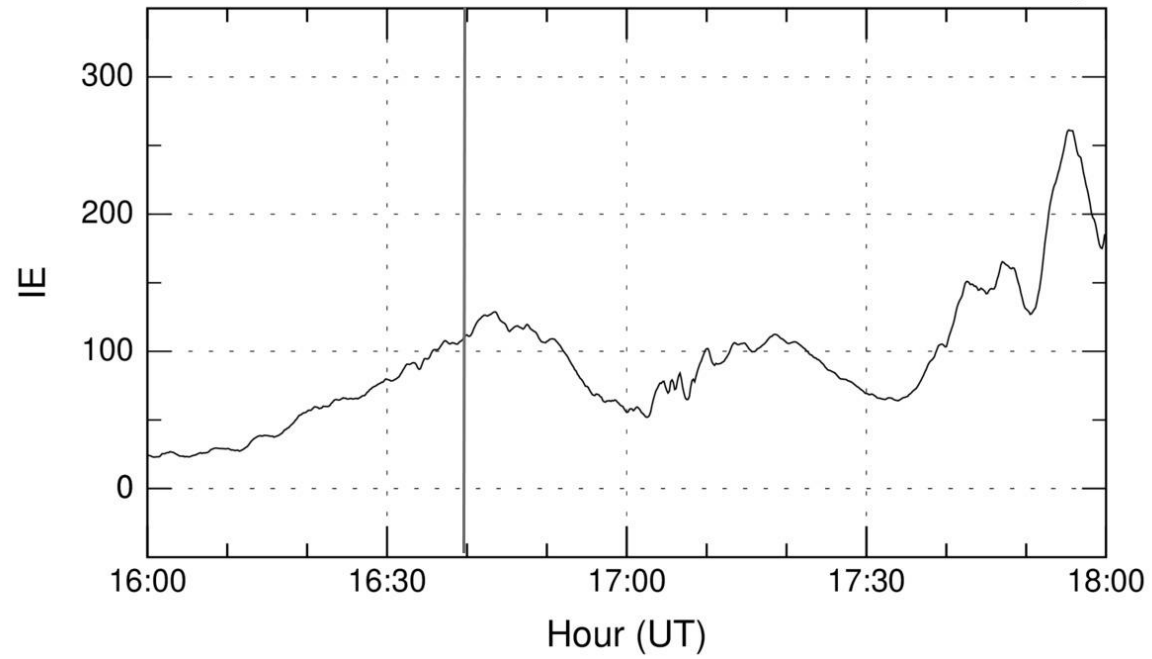
4 4+3+2+1 2-2 3-

Геомагнитный эффект



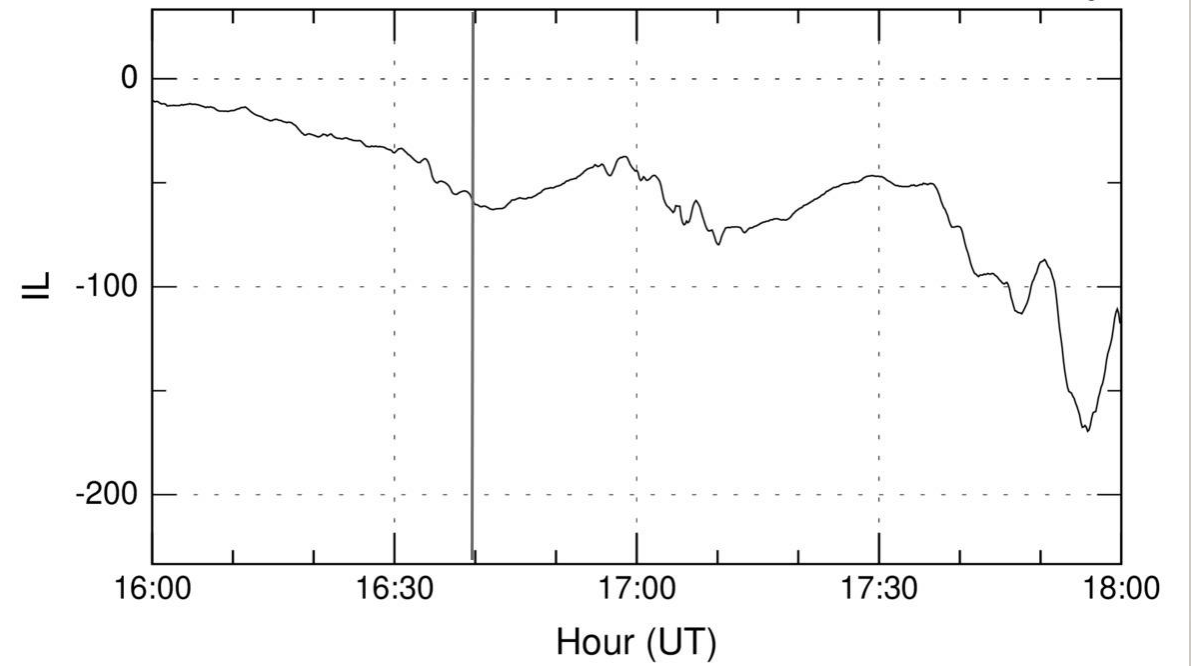
IE index 2017-11-16 16 - 18 UT

10 second averages



IL index 2017-11-16 16 - 18 UT

10 second averages



Заключение

В рассмотренных случаях в геомагнитном поле и ионосфере было зафиксированы резкие изменения измеренных параметров, которые можно объяснить воздействием ударных, акустико-гравитационных и медленных магнитогидродинамических волн, образованных в результате взрыва метеора. Предполагается, что мелкомасштабные вариации геомагнитного поля после взрыва метеора вызваны модуляцией ионосферных токов в динамо-области ионосферы акустическими и акустико-гравитационными волнами. Предложено объяснение резких изменений вариаций геомагнитного поля воздействием ударной волны от взрыва метеора на авроральные электроджеты.

Спасибо за внимание!