

# ЭФФЕКТЫ ИОНИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОПРОСАХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ.

С.А. Пулинец

*Институт космических исследований РАН*

# СОДЕРЖАНИЕ

1. **Источники ионизации**
  2. **Последствия ионизации**
    - a) Нуклеция, индуцированная ионами
    - b) Тепловые эффекты
    - c) Модификация ГЭЦ
    - d) Ионосферные эффекты
  3. **ГКЛ, облака и ураганы**
  4. **Пылевые бури и извержения вулканов**
  5. **Радиоактивное загрязнение**
  6. **Замлетрясения и возможности краткосрочного прогноза**
  7. **Заключение**
- 



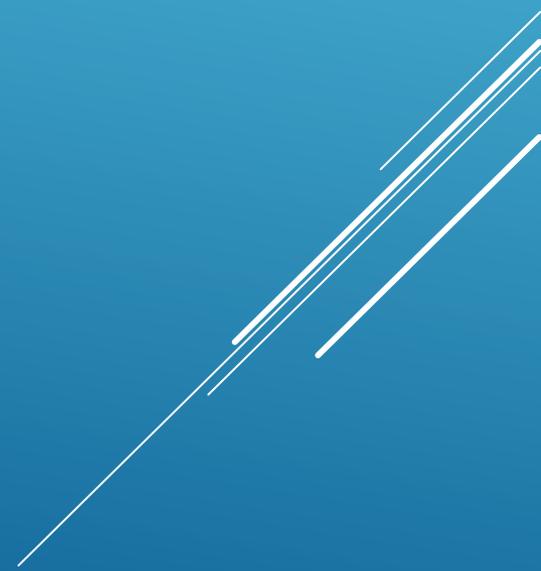
КАК ОБРАЗУЕТСЯ ЯДЕРНЫЙ ГРИБ?

# КАКОВА СКОРОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЛАКОВ?



- ▶ **Природная радиоактивность Земли**
- ▶ **Галактические космические лучи**
- ▶ **Солнечные космические лучи**
- ▶ **Ядерные взрывы**
- ▶ **Аварии на атомных электростанциях**
- ▶ **Радиоактивные отходы и аварии на предприятиях ядерного цикла**
- ▶ **Грозовая активность**
- ▶ **Искусственная ионизация**

## **ИСТОЧНИКИ ИОНИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ**



# ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

The primary source of ions in PBL over land is natural radioactivity originating from ground

(Hoppel et al., 1998)

## Радиоактивность земли

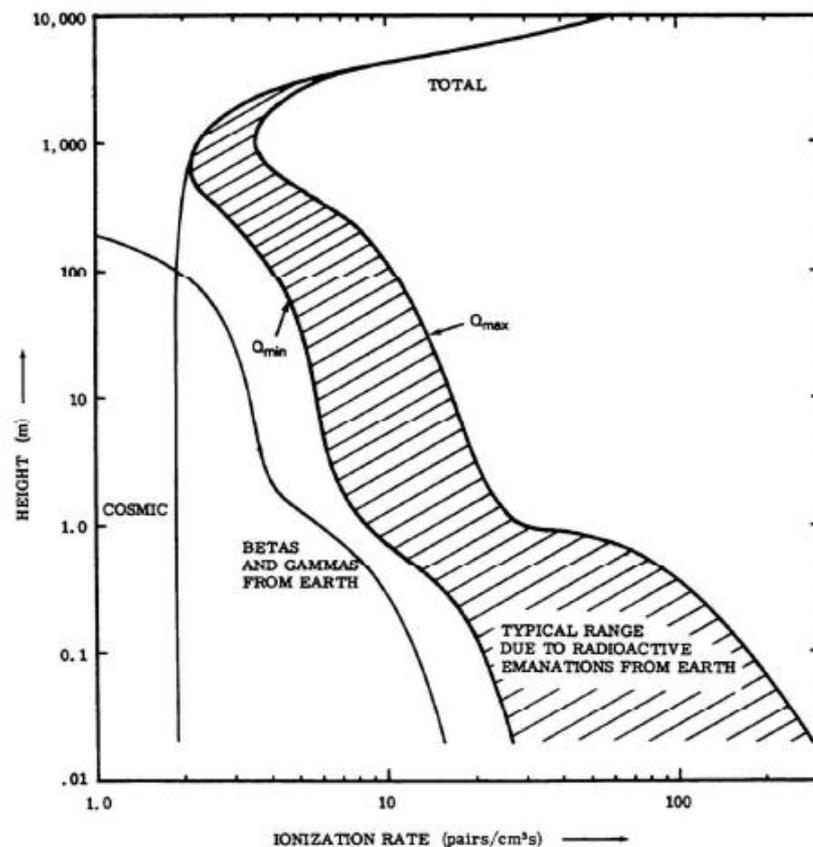
$Rn^{222}$  – период полураспада– 91 h 12 мин ~ 3.82 дней

$Tn^{220}$  – период полураспада– 54.5 s

$An^{219}$  – период полураспада– 3.92 s

Всего – 19 изотопов радона с атомным весом от 204 до 224

Радиоактивный углерод  $C^{14}$  – период полураспада – 5730 лет

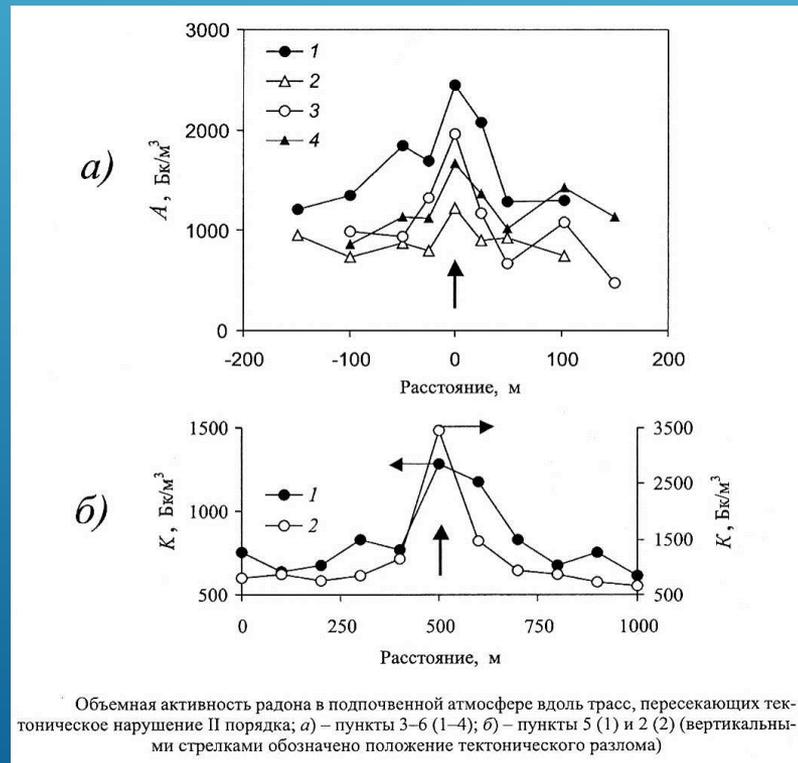
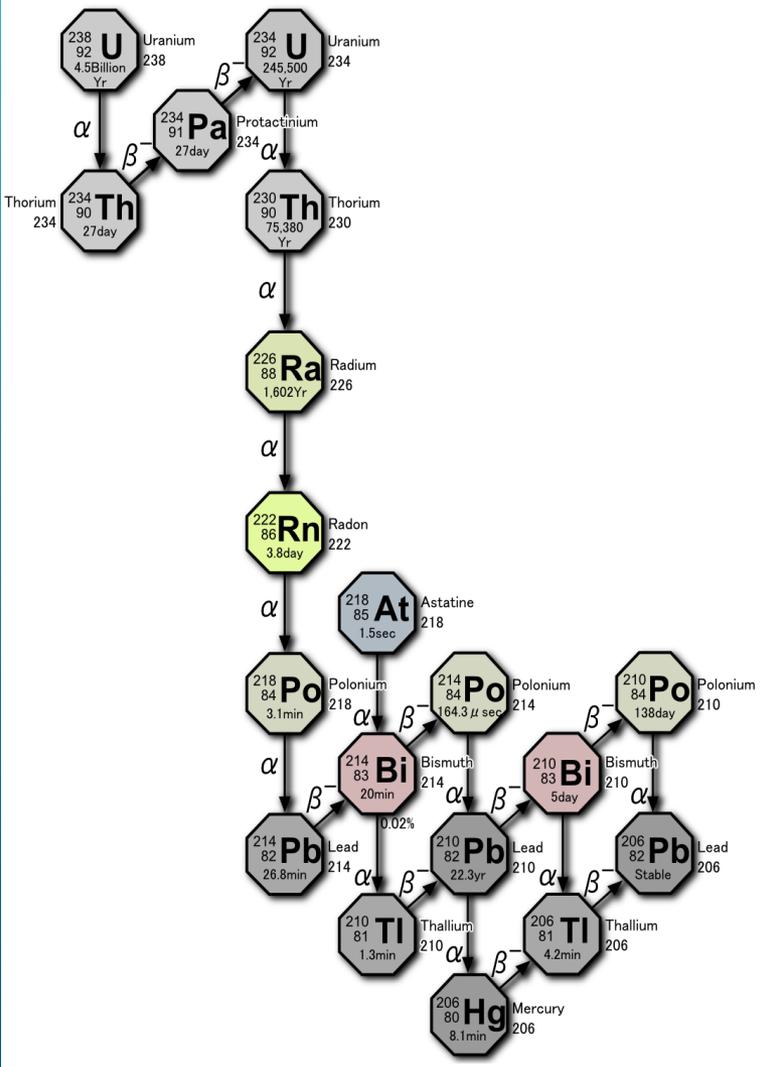


# ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ

Каждая  $\alpha$ -частица, испускаемая  $^{222}\text{Rn}$ , обладает энергией  $E_{\alpha}=5.46$  МэВ и производит  $\sim 3 \cdot 10^5$  ион-электронных пар

Активность радона в сейсмоактивных областях составляет  $\sim 2000$  Вк/м<sup>3</sup> (Inan, 2008)

Скорость ионообразования  $\sim 6 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>



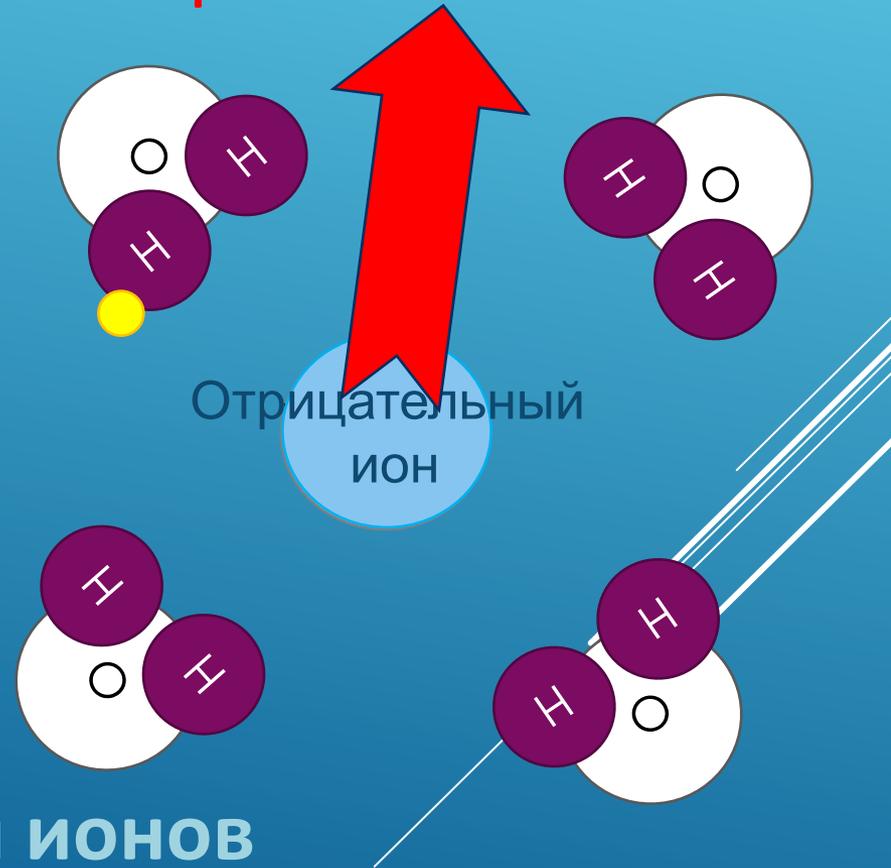
Объемная активность радона в подпочвенной атмосфере вдоль трасс, пересекающих тектоническое нарушение II порядка; а) – пункты 3–6 (1–4); б) – пункты 5 (1) и 2 (2) (вертикальными стрелками обозначено положение тектонического разлома)

# ОСНОВНОЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ – СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА, ВЫДЕЛЯЕМАЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИОНИЗАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ГИДРАТАЦИИ ИОНОВ

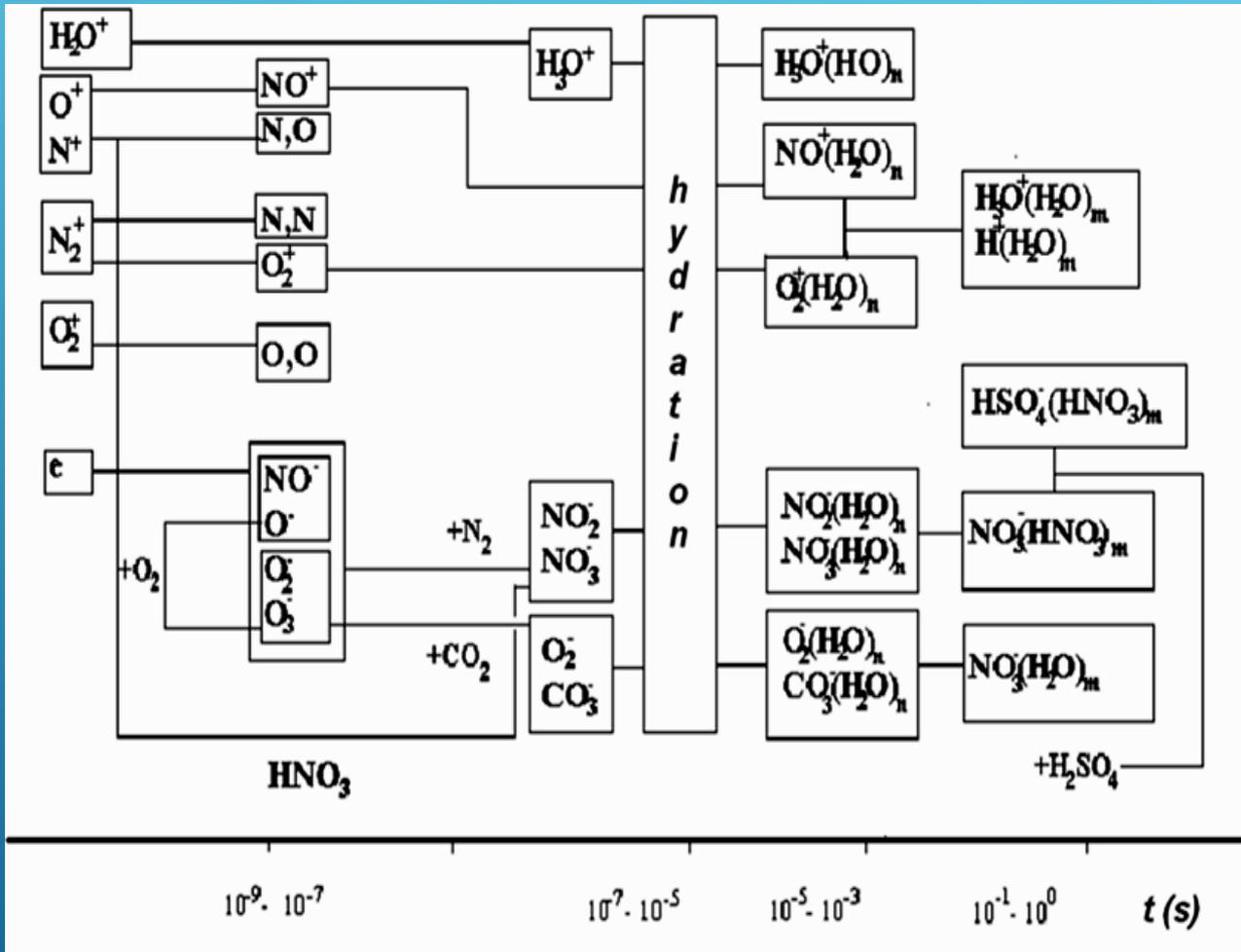
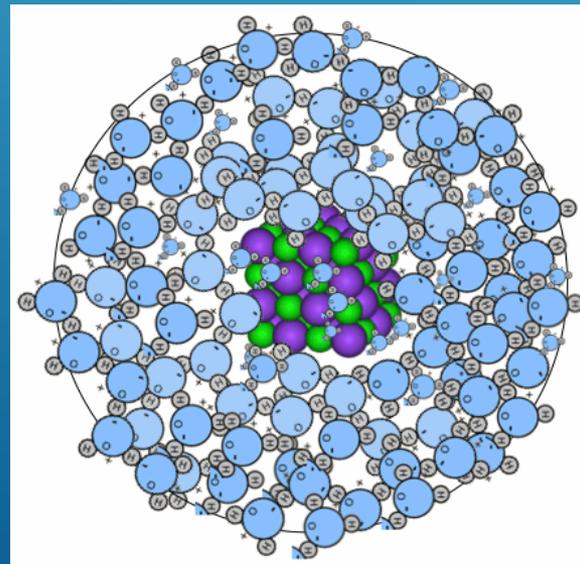
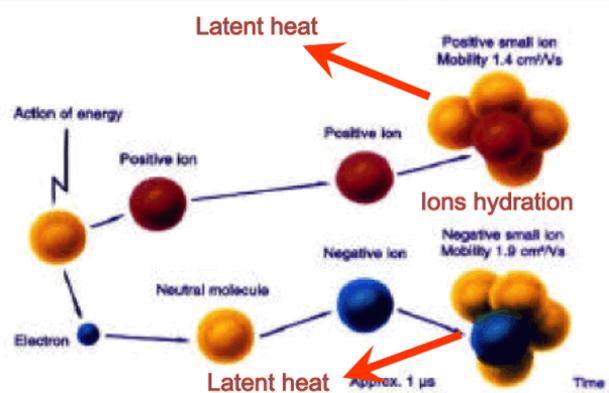
Скрытая теплота



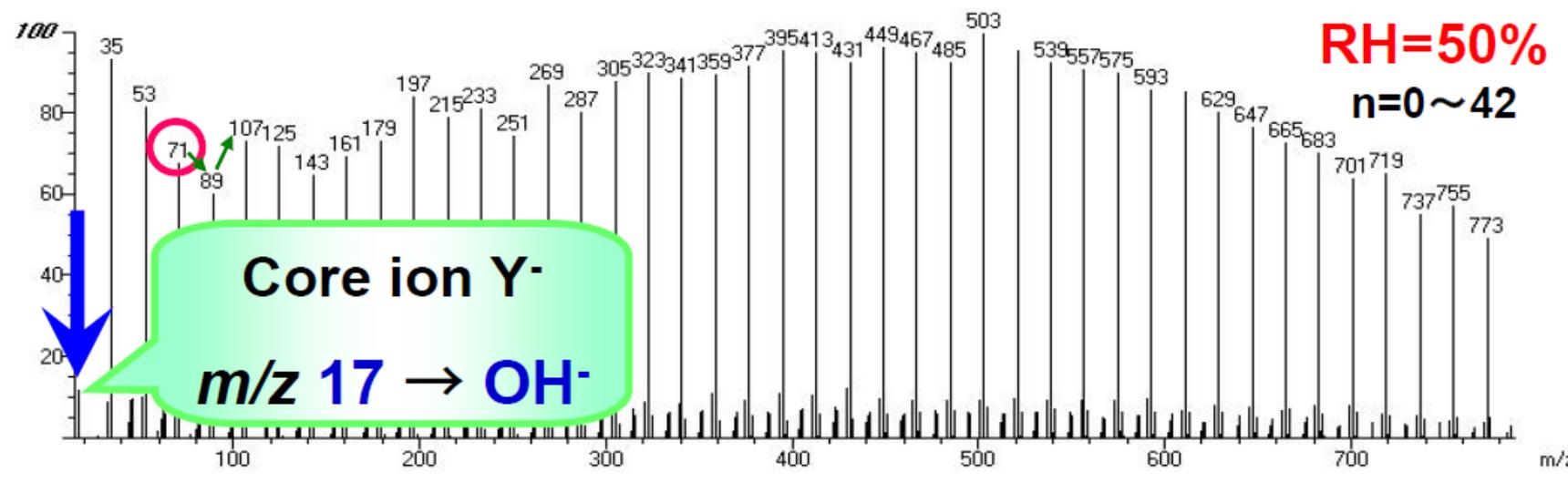
Скрытая теплота



# МИКРОФИЗИКА ПРОЦЕССА НУКЛЕАЦИИ, ИНДУЦИРУЕМОЙ ИОНАМИ (IIN)



negative

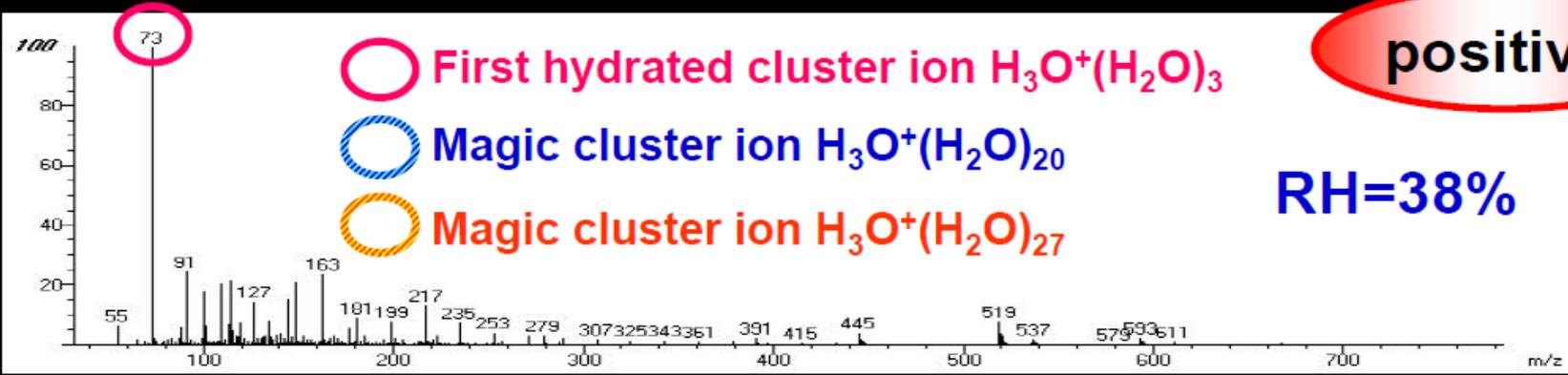


The mass spectra of  $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n$  in ambient air with two different relative humidities at  $24^\circ\text{C}$ .

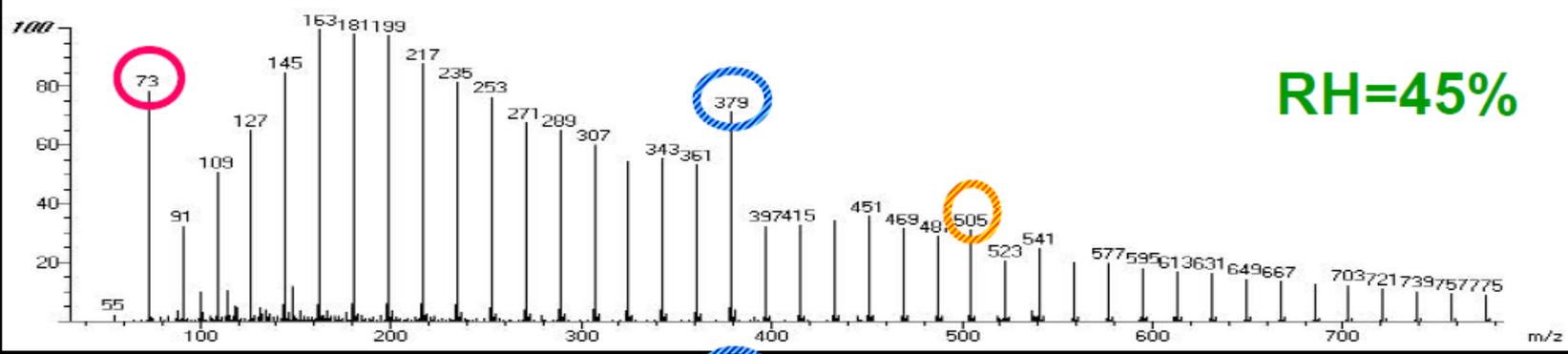
positive

- First hydrated cluster ion  $H_3O^+(H_2O)_3$
- Magic cluster ion  $H_3O^+(H_2O)_{20}$
- Magic cluster ion  $H_3O^+(H_2O)_{27}$

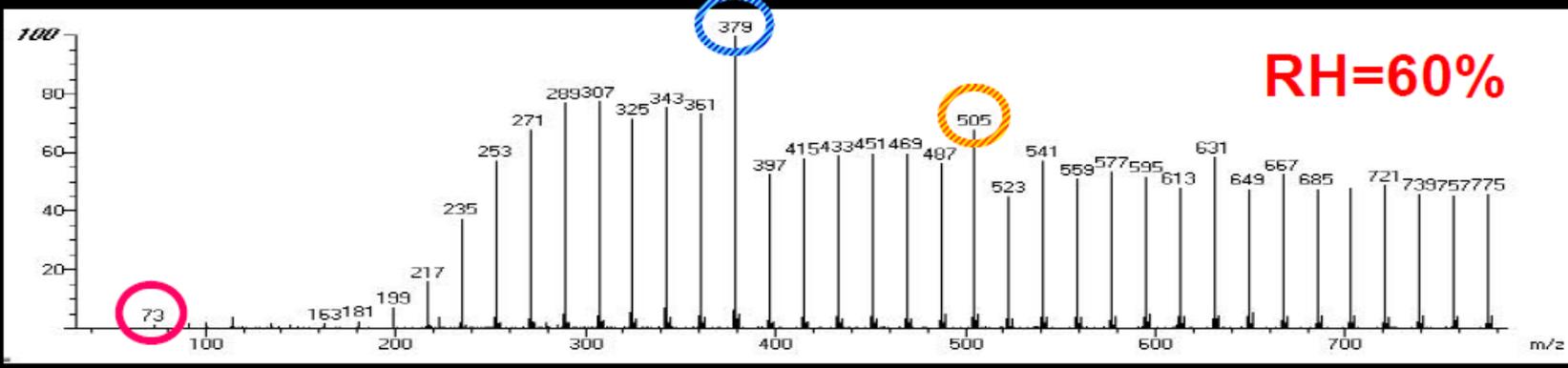
RH=38%



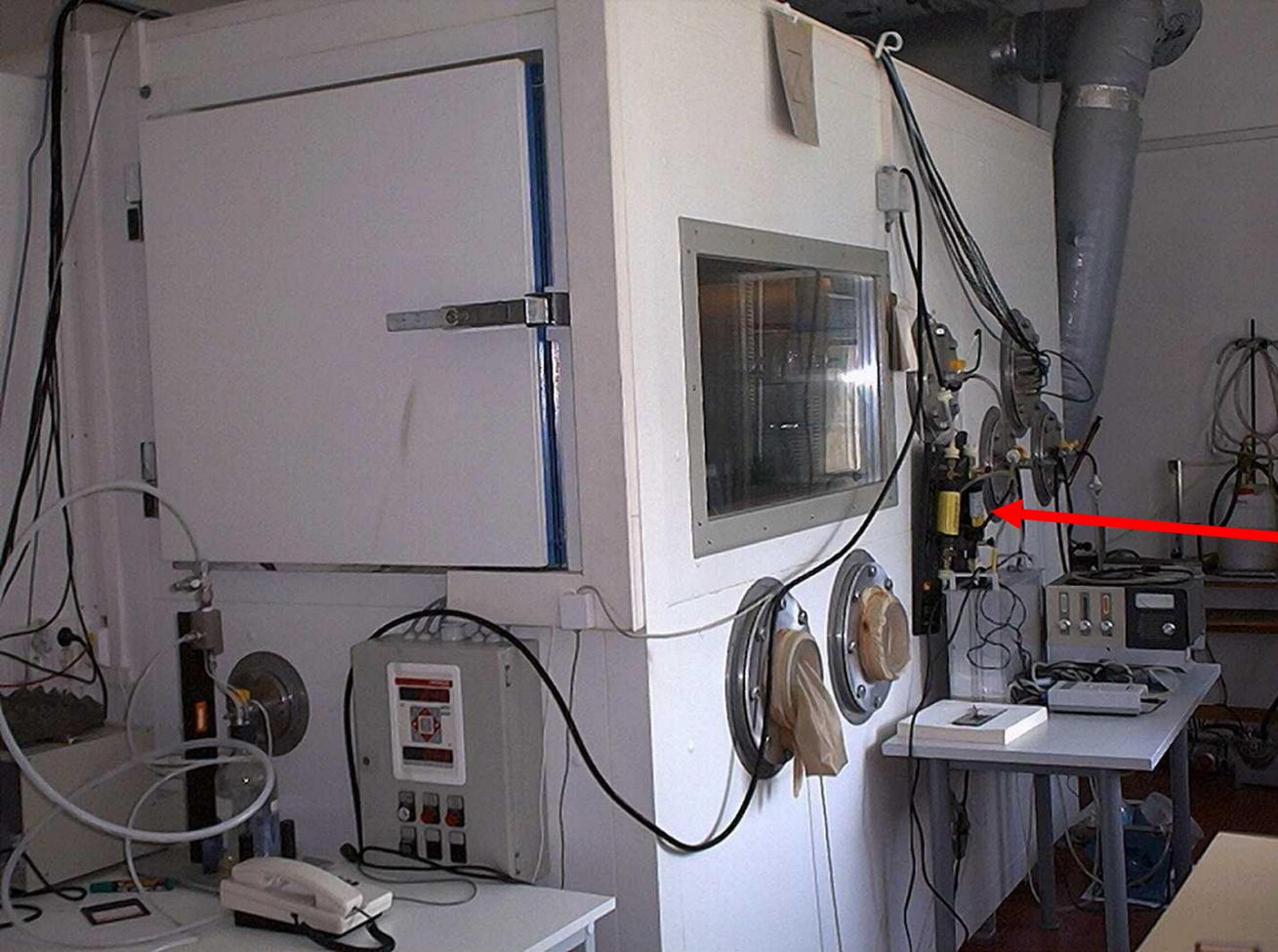
RH=45%



RH=60%



The mass spectra of  $H_3O^+(H_2O)_n$  in ambient air with three different relative humidities at 24°C.



Martinelli G., Solecki A.T., Tchorz-Trzeciakiewicz D.E., Piekarz M., Grudzinska K.K.

Laboratory experiments on Rn <sup>222</sup> exposure effects on local environmental temperature: implications for satellite TIR measurements

Time (hr)	Rn <sup>222</sup> (kBq/m <sup>3</sup> )	Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Absolute Humidity (g/m <sup>3</sup> )
1	0.043	20.2	28.5	5.0
2	0.029	20.2	75	13.2
3	<b>Было выделено ~ 3·10<sup>4</sup> Дж</b>			
4	6.144	20.6	71.5	12.9
5	6.144	20.6	70.5	12.7
6	5.696	20.6	70.5	12.7
7	5.792	20.6	68.7	12.4

Drop in absolute humidity = 0.8 (g/m<sup>3</sup>)      Specific Latent heat 2256 J/g

Expected temperature rise = 0,34 (°C)

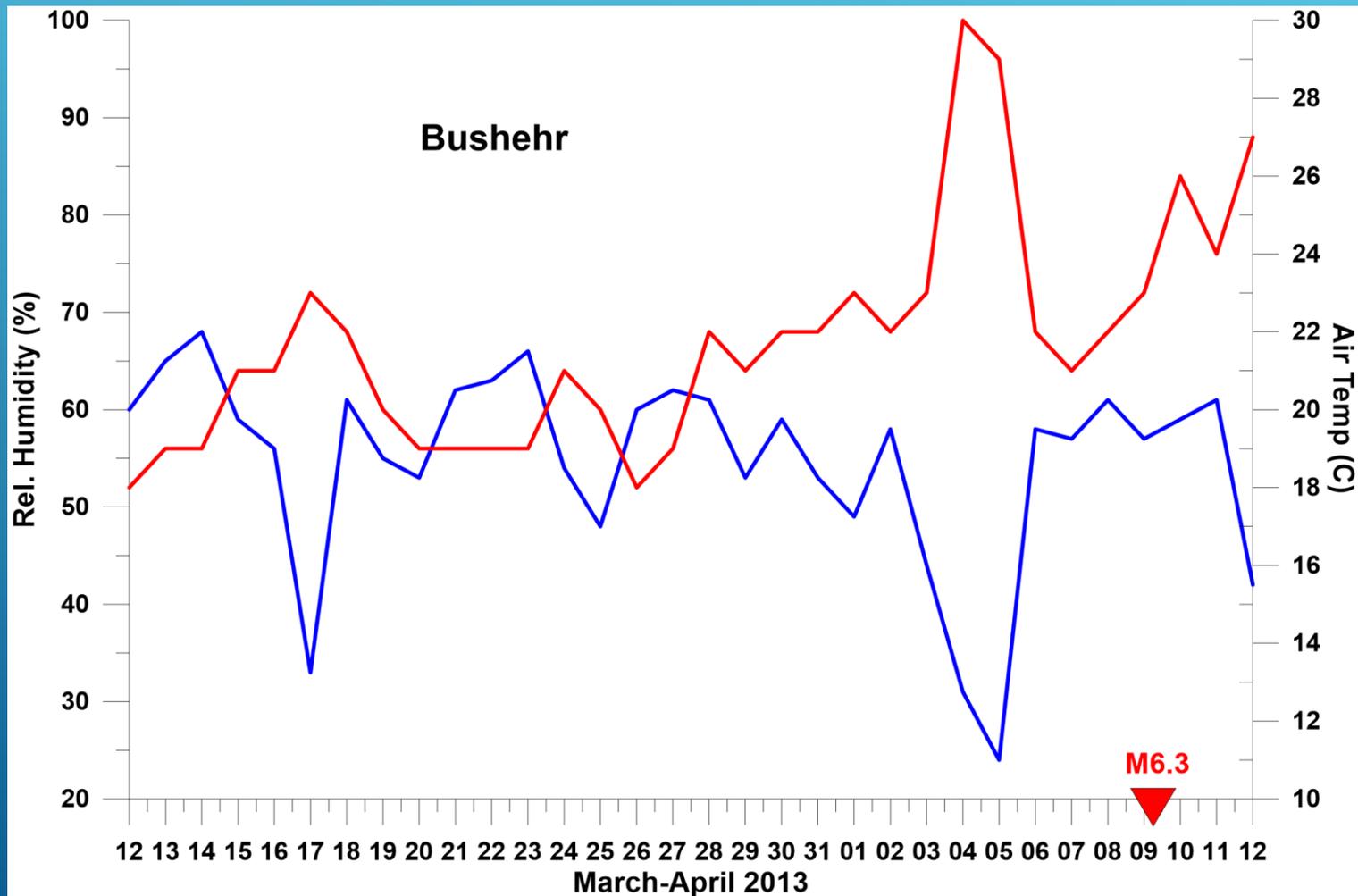
Observed temperture rise = 0.4 (°C)

# LABORATORY PROOF



РАЗНИЦА МЕЖДУ ЗАКРЫТОЙ И  
ОТКРЫТОЙ СИСТЕМАМИ

# АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ



# НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ

Каждая  $\alpha$ -частица, излучаемая  $^{222}\text{Rn}$  с энергией  $E_{\alpha}=5.46$  МэВ может создать  $\sim 3 \cdot 10^5$  электрон-ионных пар.

Средняя активность радона перед землетрясением  $\sim 2000$  Бк/м<sup>3</sup> бывает и гораздо больше

Тогда скорость ионообразования  $\sim 6 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>м<sup>-3</sup>

Гидратированный ион размером порядка 1  $\mu$  содержит порядка  $0.4 \cdot 10^{12}$  молекул воды

При конденсации выделение скрытой теплоты составляет  $U_0 \sim 40.68 \cdot 10^3$  Дж/моль (1 моль =  $6.022 \cdot 10^{23}$ ) или 0.422 эВ на молекулу

При заданной активности радона и формировании гидратированных ионов размером порядка 1  $\mu$  выделение скрытой теплоты составит **16 Вт/м<sup>2</sup>**

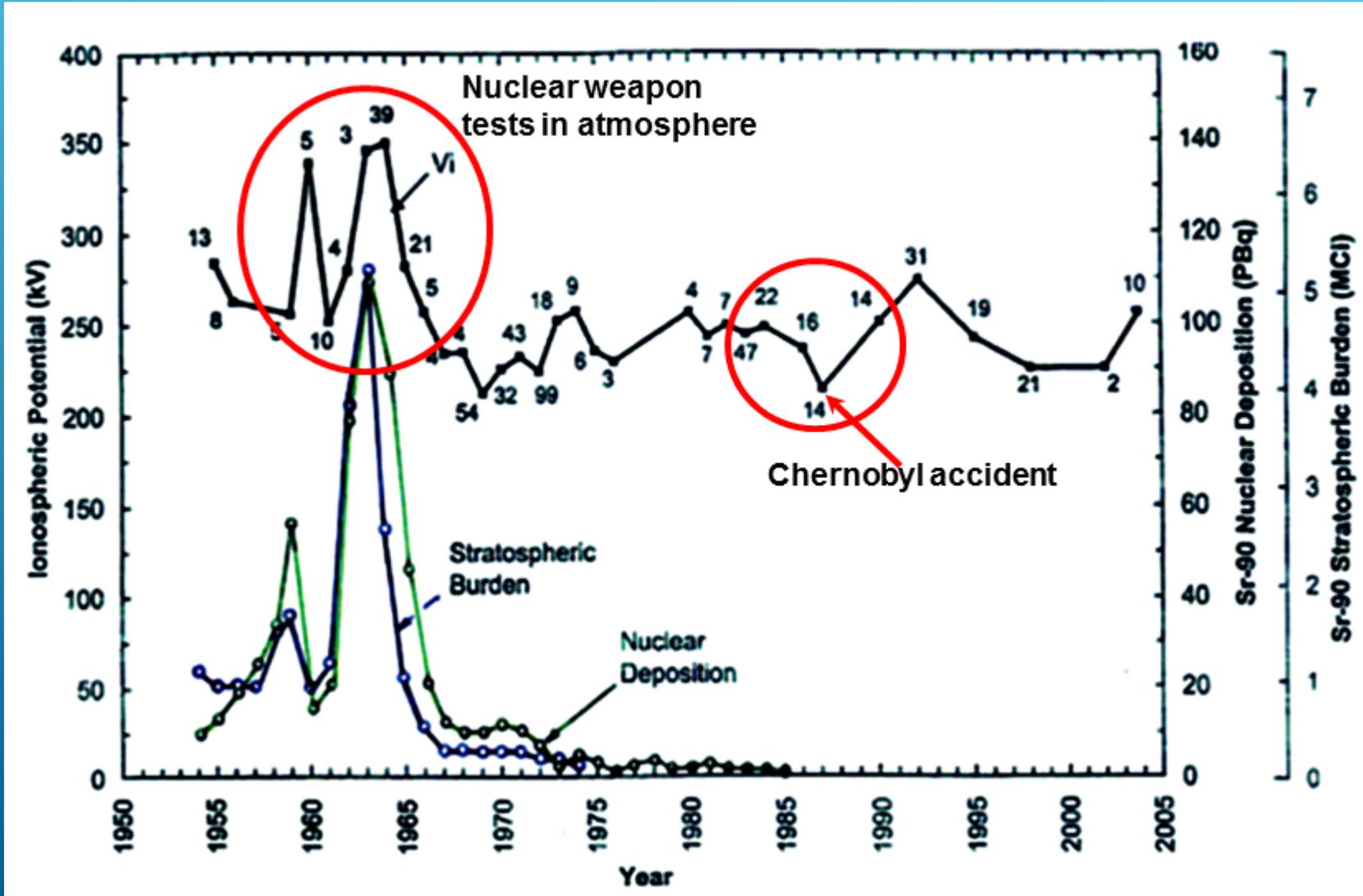
**1 эВ =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж**, при активности радона 2000 Бк/м<sup>3</sup>с затраты на ионизацию составят  **$1.7 \cdot 10^{-9}$  Вт**

Тогда **энергетическая эффективность** процесса  $16/1.7 \cdot 10^{-9} \sim 10^{10}$

Можно считать по-другому: потенциал ионизации молекул газов  $\sim 17$ эВ

$0.4 \cdot 10^{12} \cdot 0.422$  эВ =  $17 \cdot 10^{10}$  эВ/17 эВ =  $10^{10}$

# ЭФФЕКТ ИСПЫТАНИЙ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ В АТМОСФЕРЕ



# АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Вертикальный ток

$$i = e(n^+ \mu^+ + n^- \mu^-)E = \sigma E$$

Полная проводимость

$$\sigma = e(n^+ \mu^+ + n^- \mu^-)$$

$$\sigma = e \sum_{i=1}^n (n_i^+ \mu_i^+ + n_i^- \mu_i^-)$$

The ion-pair production rate due to radon and its progeny is calculated using the expression:  $Q = \varepsilon / I$  and  $\varepsilon = 5.49 \times 10^6 Rn + 6.00 \times 10^6 RaA + 0.85 \times 10^6 RaB + 7.69 \times 10^6 RaC$

The conductivity of the atmosphere in the absence and presence of aerosols, respectively, are given by:

$$\sigma_0 = N_0 e b_{\pm} \quad \& \quad \sigma_{\pm} = N_{\pm} e b_{\pm} \quad (14)$$

The reduction in conductivity ( $\Delta\sigma$ ) due to depletion of small ions is given by:

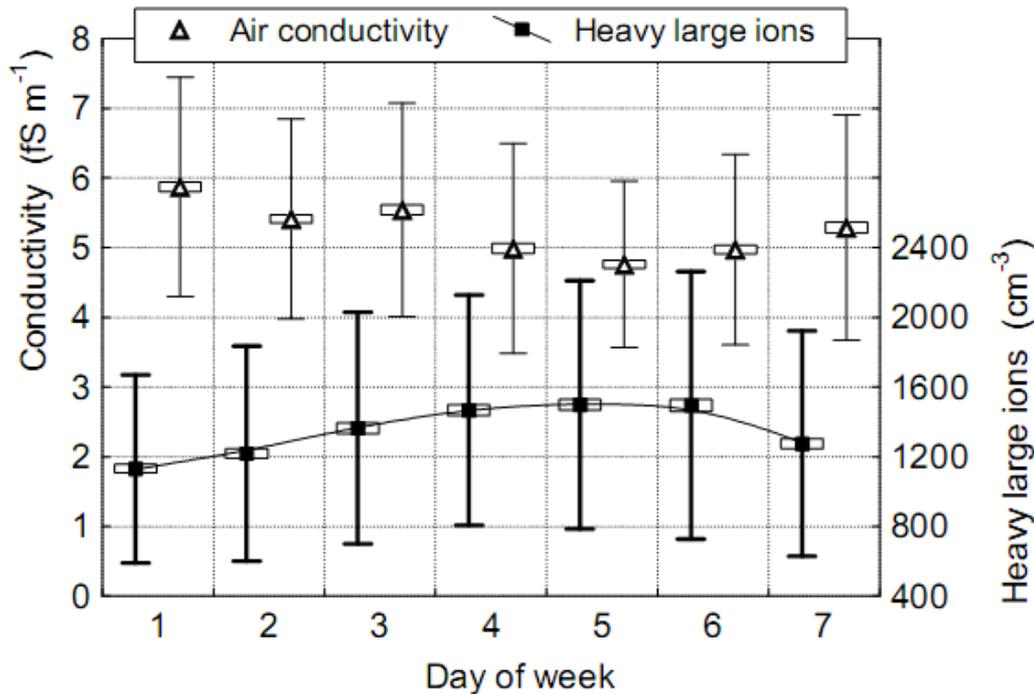
$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_{\pm}$$

Подвижность  
ионов

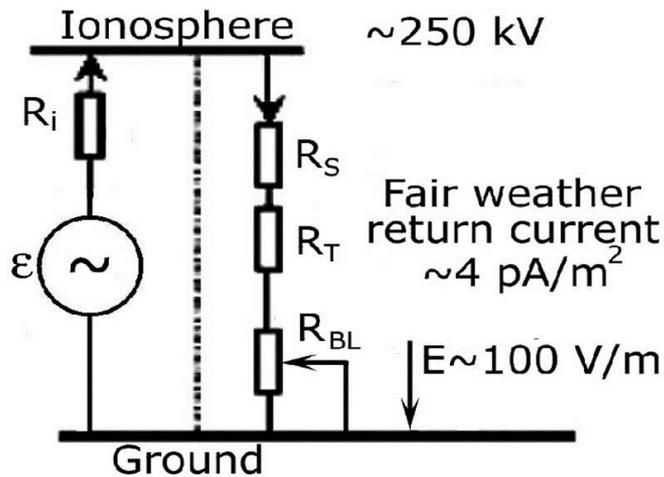
$$u = a(e/m)(\lambda_u/v_T)$$

$\lambda$  – длина свободного пробега  
 $v$  – средняя тепловая скорость

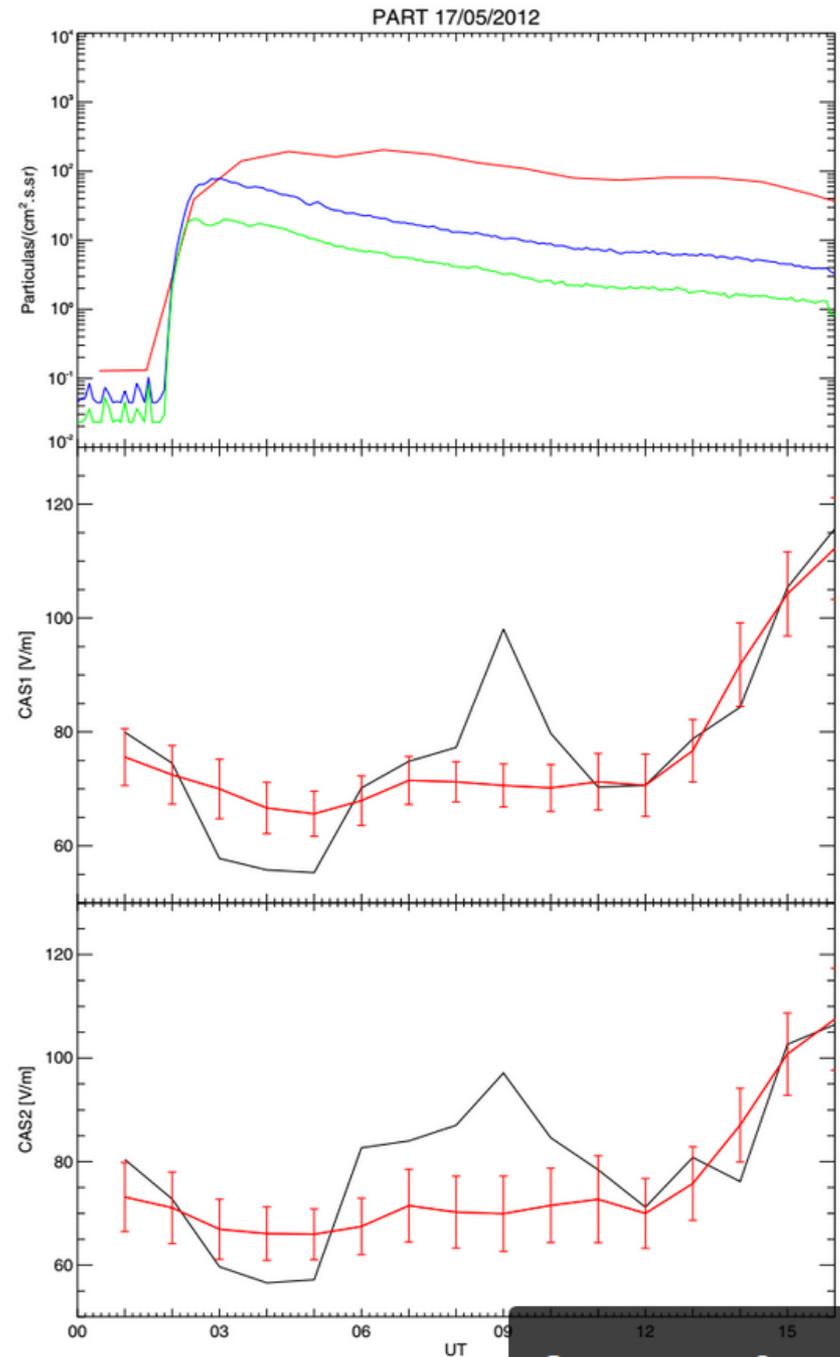
# ВТОРОЙ НЕДОСМОТР



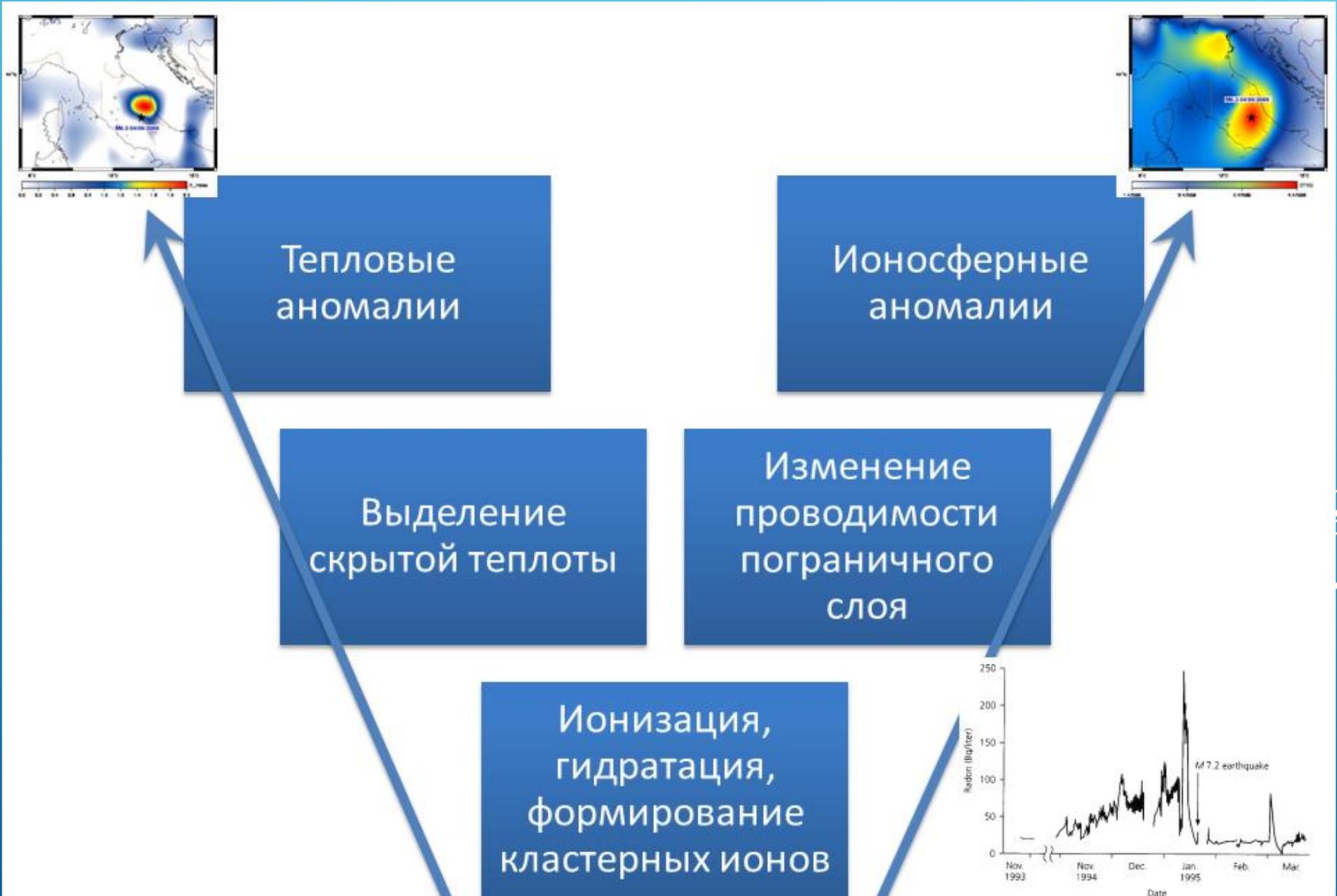
Ana-lyzer	Fraction	Mobility $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	Diameter nm
<i>Small Cluster Ions</i>			
IS <sub>1</sub>	$N_1/P_1$	2.51–3.14	0.36–0.45
IS <sub>1</sub>	$N_2/P_2$	2.01–2.51	0.45–0.56
IS <sub>1</sub>	$N_3/P_3$	1.60–2.01	0.56–0.70
IS <sub>1</sub>	$N_4/P_4$	1.28–1.60	0.70–0.85
<i>Big Cluster Ions</i>			
IS <sub>1</sub>	$N_5/P_5$	1.02–1.28	0.85–1.03
IS <sub>1</sub>	$N_6/P_6$	0.79–1.02	1.03–1.24
IS <sub>1</sub>	$N_7/P_7$	0.63–0.79	1.24–1.42
IS <sub>1</sub>	$N_8/P_8$	0.50–0.63	1.42–1.60
<i>Intermediate Ions</i>			
IS <sub>1</sub>	$N_9/P_9$	0.40–0.50	1.6–1.8
IS <sub>1</sub>	$N_{10}/P_{10}$	0.32–0.40	1.8–2.0
IS <sub>1</sub>	$N_{11}/P_{11}$	0.25–0.32	2.0–2.3
IS <sub>2</sub>	$N_{12}/P_{12}$	0.150–0.293	2.1–3.2
IS <sub>2</sub>	$N_{13}/P_{13}$	0.074–0.150	3.2–4.8
IS <sub>2</sub>	$N_{14}/P_{14}$	0.034–0.074	4.8–7.4
<i>Light Large Ions</i>			
IS <sub>2</sub>	$N_{15}/P_{15}$	0.016–0.034	7.4–11.0
IS <sub>3</sub>	$N_{16}/P_{16}$	0.0091–0.0205	9.7–14.8
IS <sub>3</sub>	$N_{17}/P_{17}$	0.0042–0.0091	15–22
<i>Heavy Large Ions</i>			
IS <sub>3</sub>	$N_{18}/P_{18}$	0.00192–0.00420	22–34
IS <sub>3</sub>	$N_{19}/P_{19}$	0.00087–0.00192	34–52
IS <sub>3</sub>	$N_{20}/P_{20}$	0.00041–0.00087	52–79



# ИЗМЕНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОСЛЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ



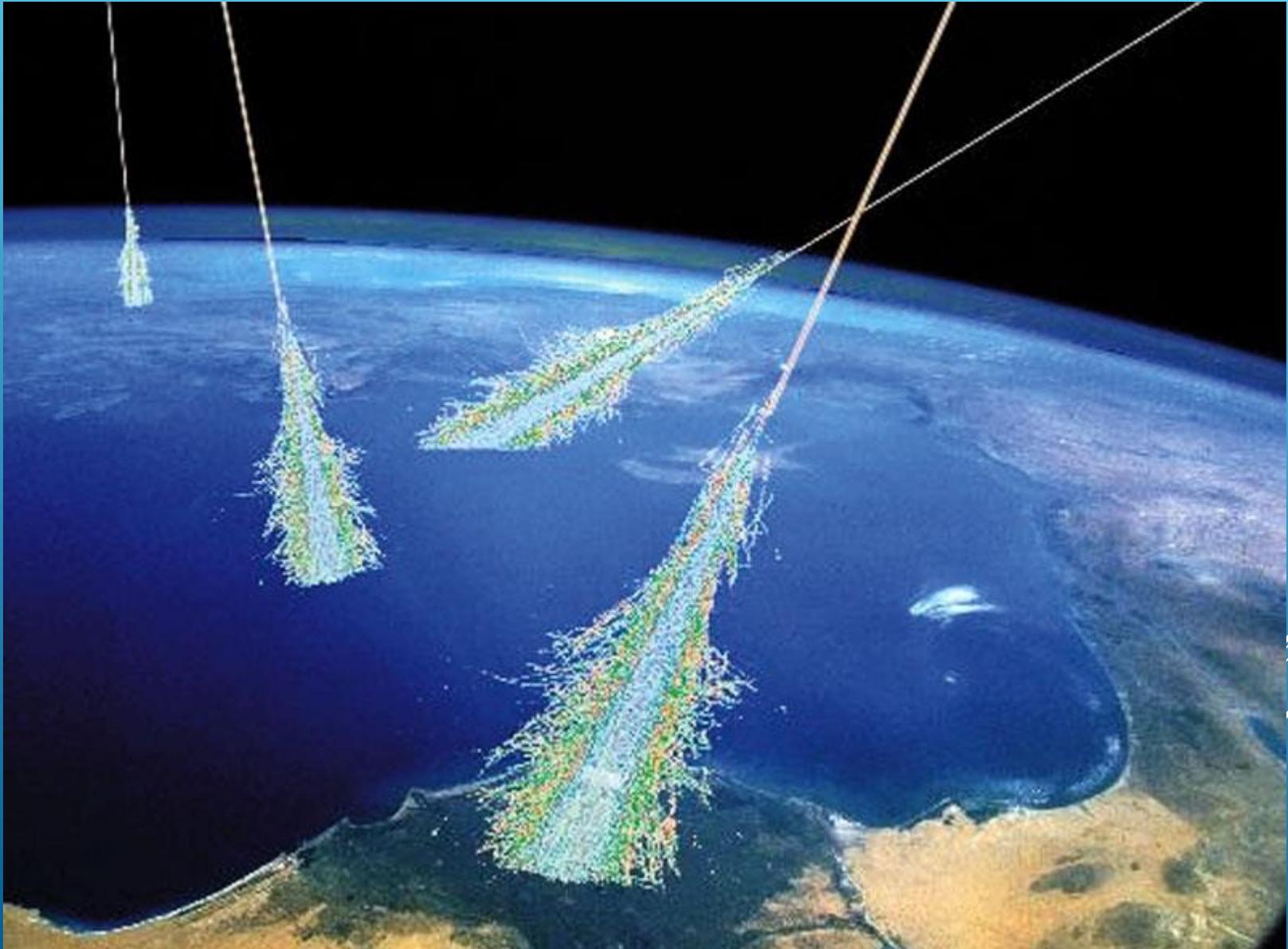
# ДВА ОСНОВНЫХ СЛЕДСТВИЯ ИОНИЗАЦИИ



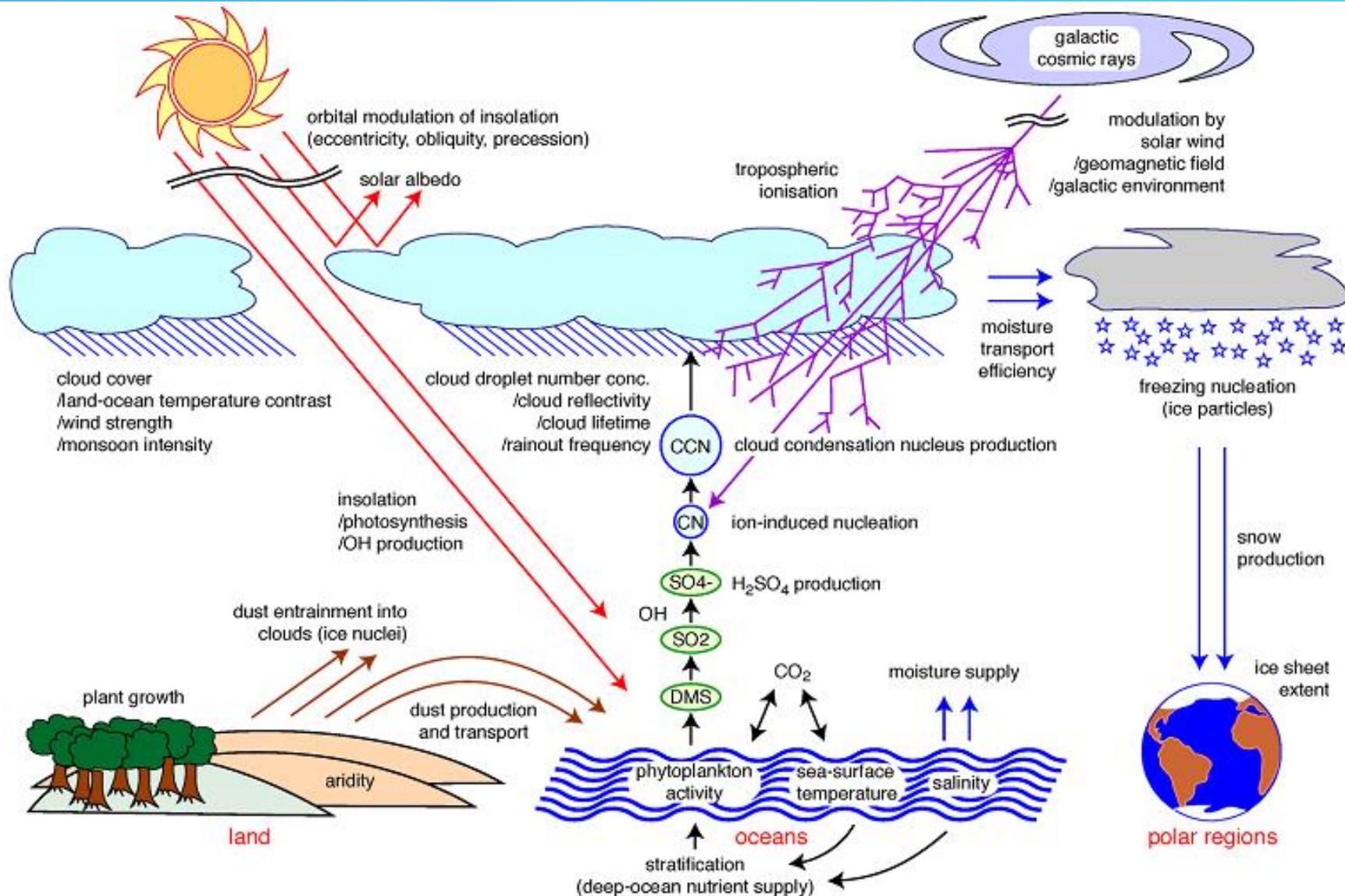
# ЭФФЕКТЫ ИОНИЗАЦИИ

<b>Усиление ионообразования</b>	<b>Уменьшение ионообразования</b>	<b>Усиление ионообразования, нет нуклеации</b>	<b>Усиление ионообразования + нуклеация</b>
Повышение температуры	Понижение температуры	Повышение проводимости пограничного слоя	Понижение проводимости пограничного слоя
Уменьшение влажности	Повышение влажности	Отрицательная аномалия в ионосфере	Положительная аномалия в ионосфере

# КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И КЛИМАТ

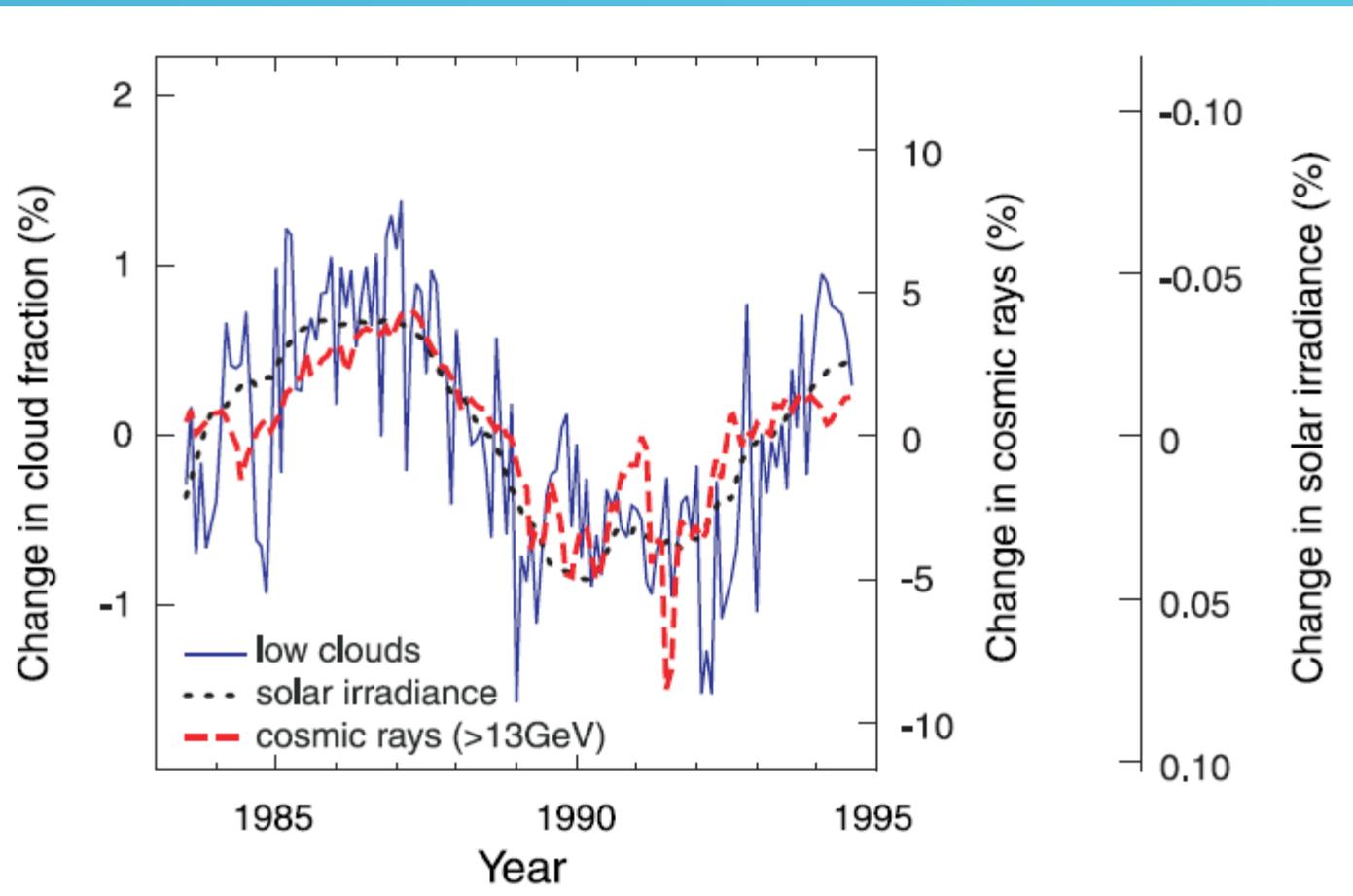


# СХЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА КЛИМАТ ЗЕМЛИ



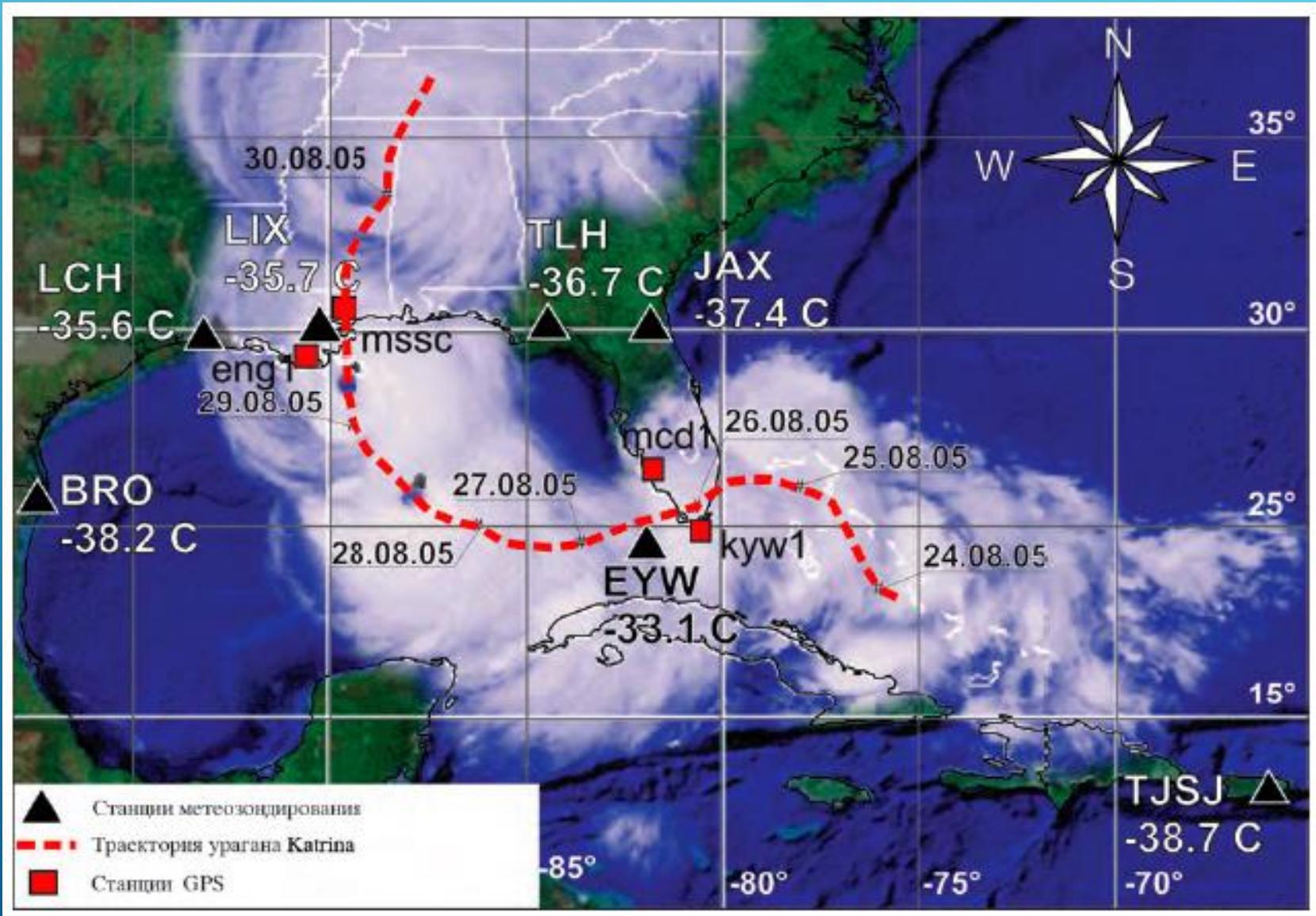
# ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ОБРАЗОВАНИЕ ОБЛАКОВ

H.Svensmark, E.Friis-Christensen,  
*J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 59, 1225 (1997).

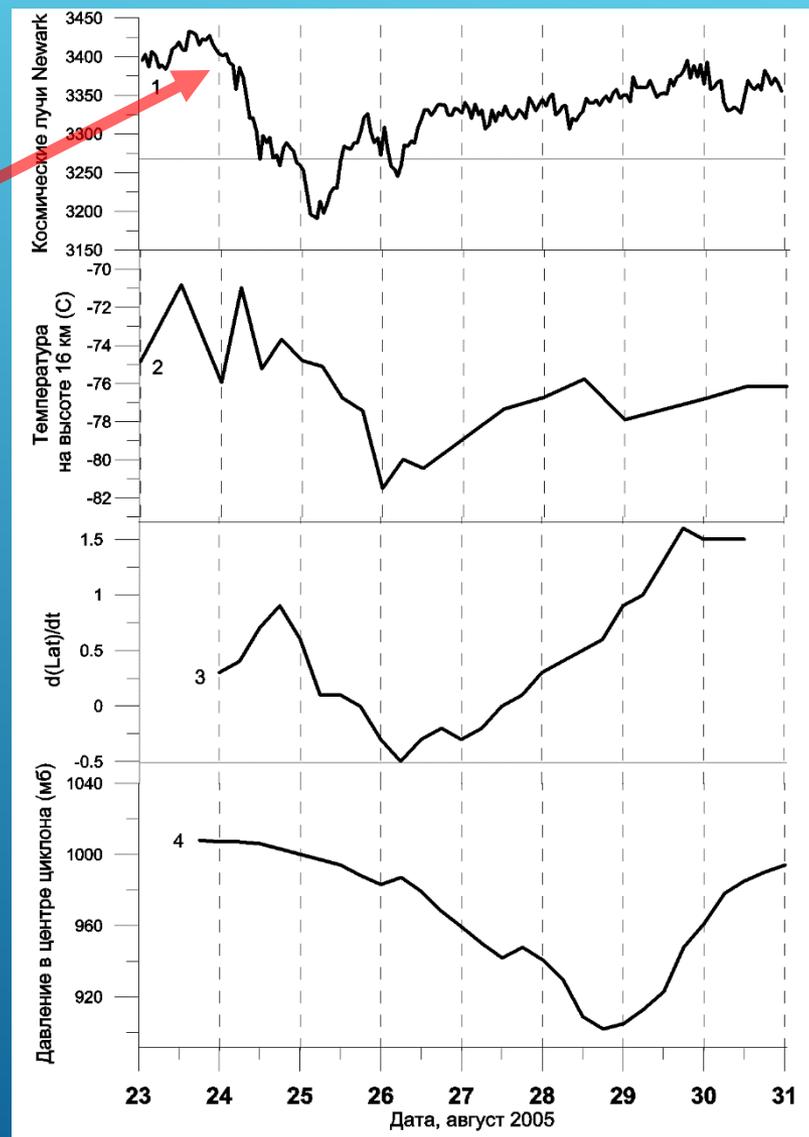
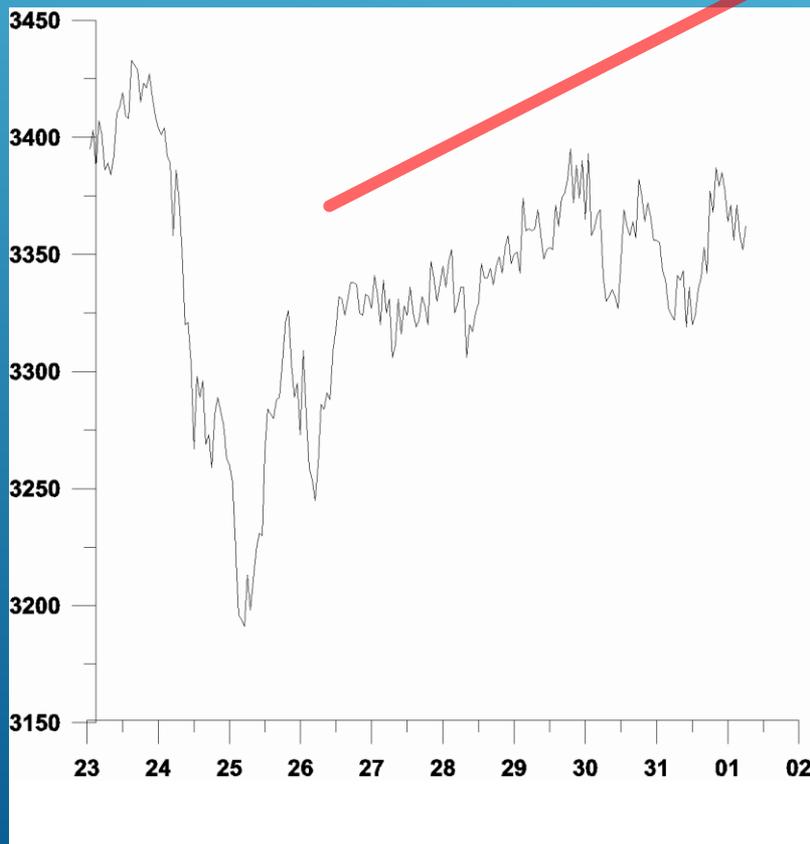


**Fig. 1.** Variation of low-altitude cloud cover, cosmic rays, and total solar irradiance between 1984 and 1994. The cosmic ray intensity is from Huancayo observatory, Hawaii. [Adapted from (4)]

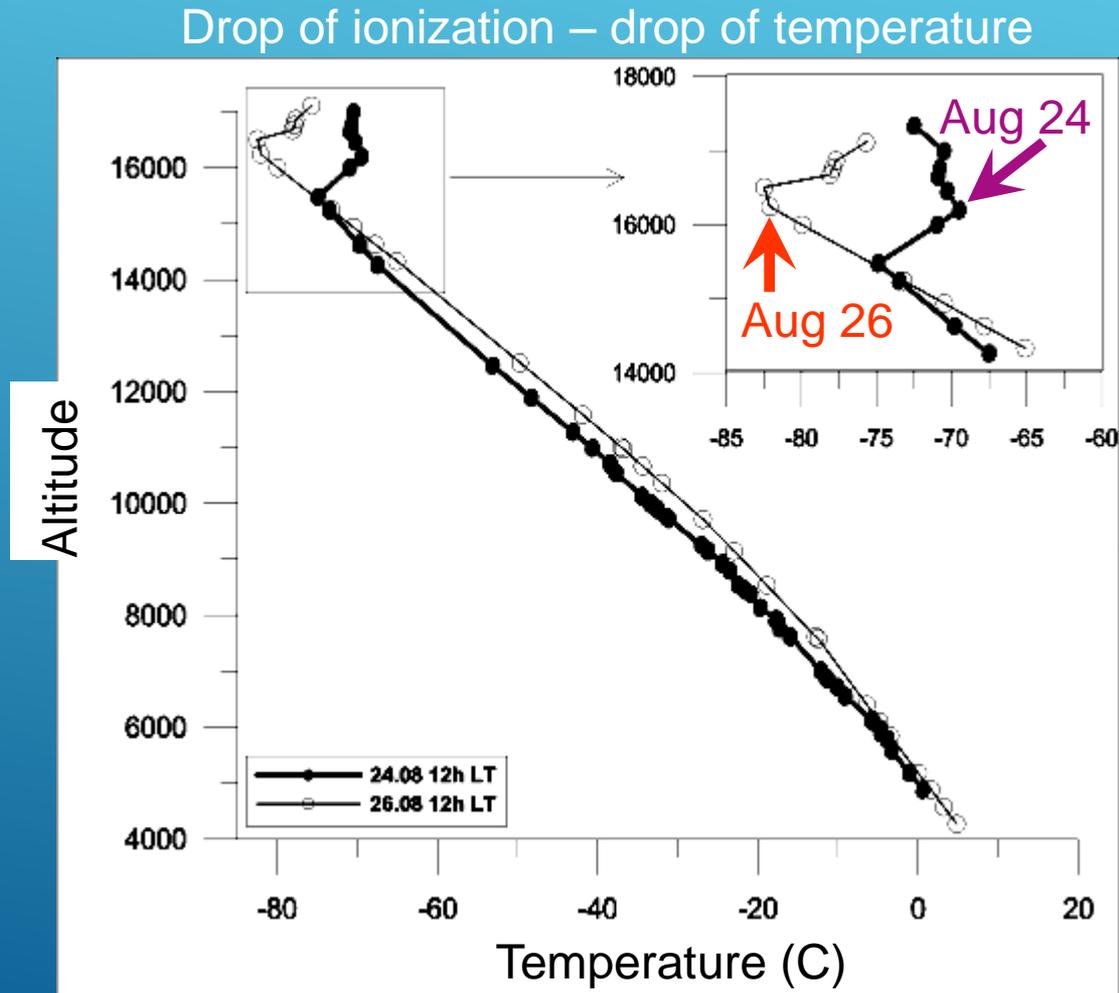
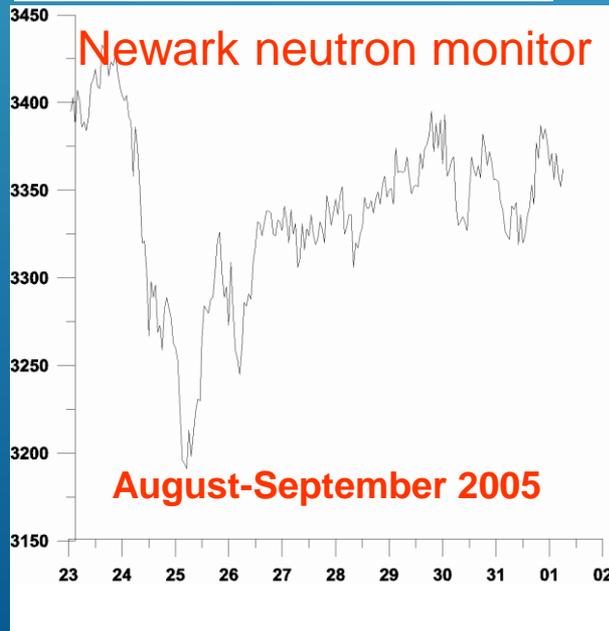
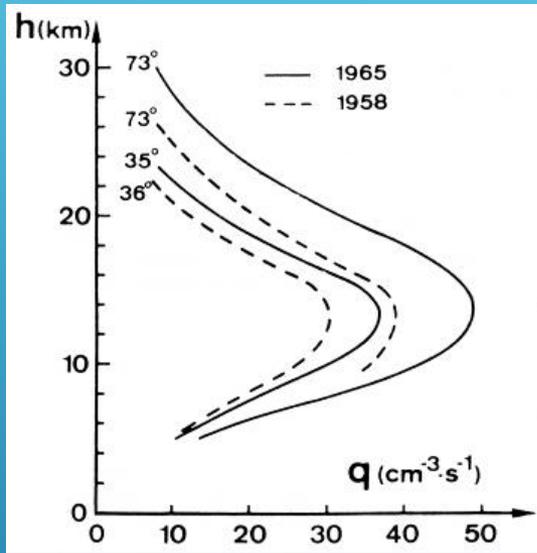
# РЕАЛЬНАЯ ИСТОРИЯ УРАГАНА КАТРИНА



# КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И УРАГАН КАТРИНА

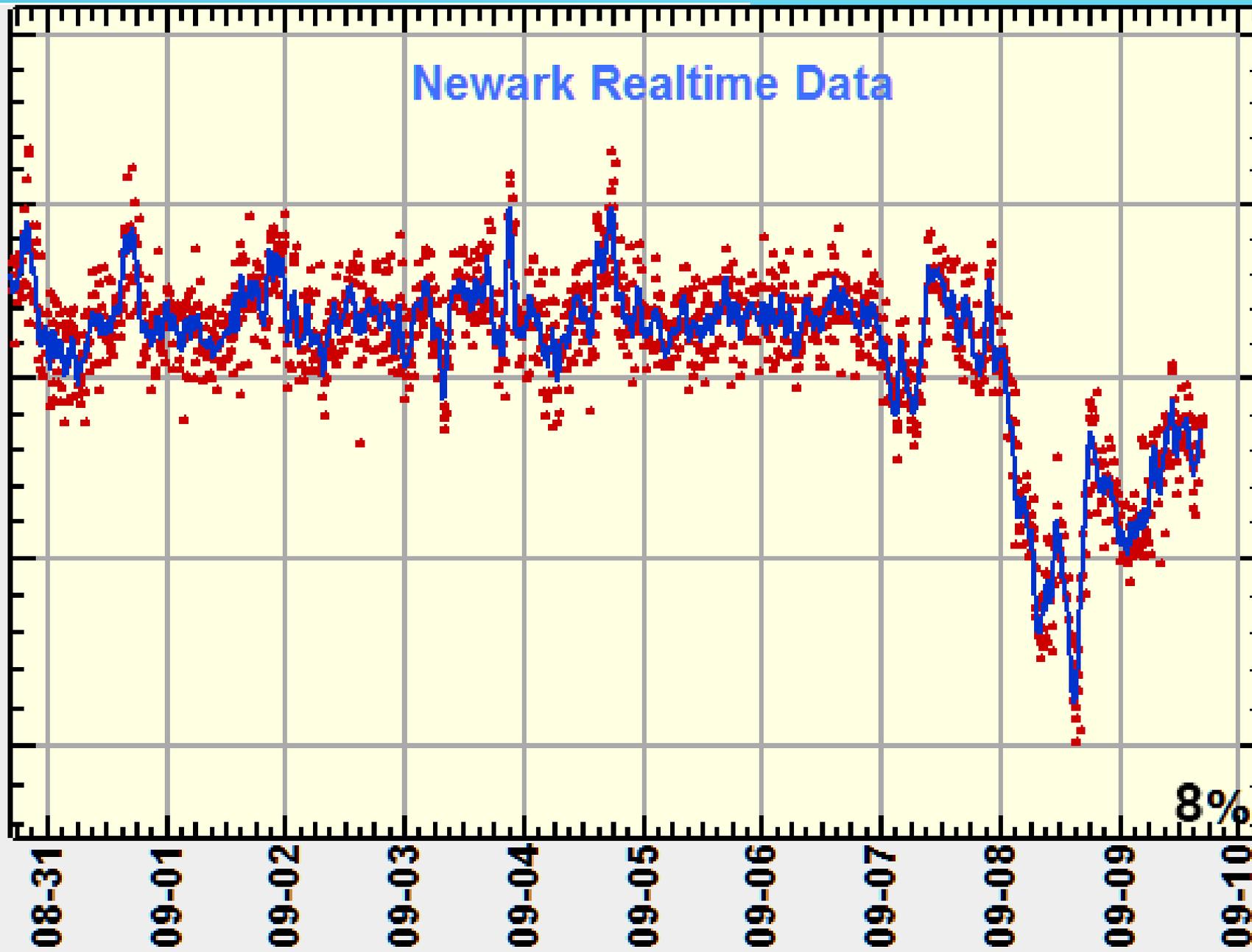


# ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ УРАГАНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГКЛ



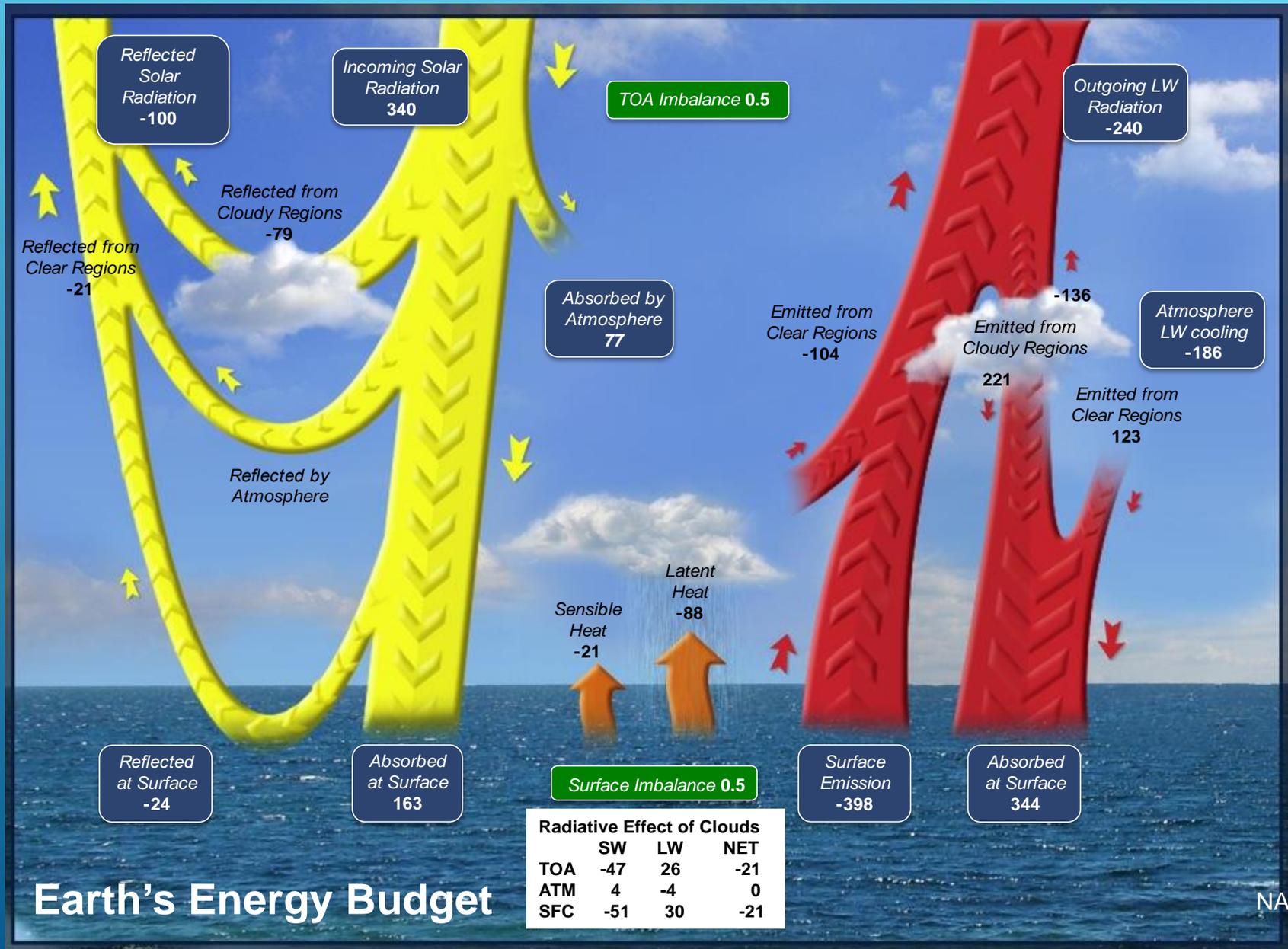
Counts/Hour/100 (log scale)

Newark Realtime Data



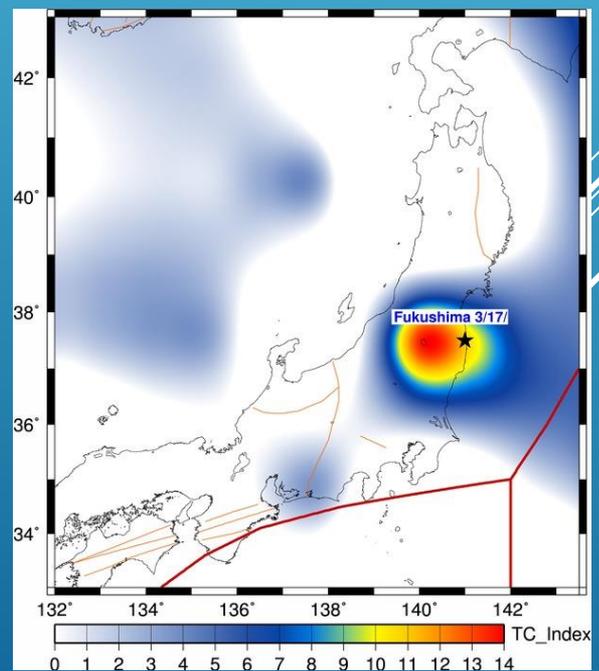
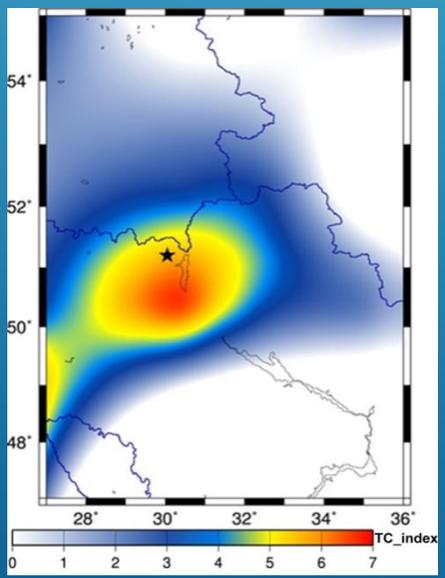
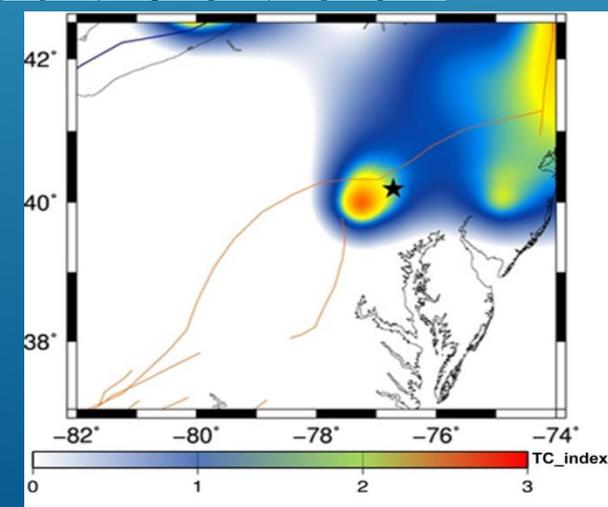
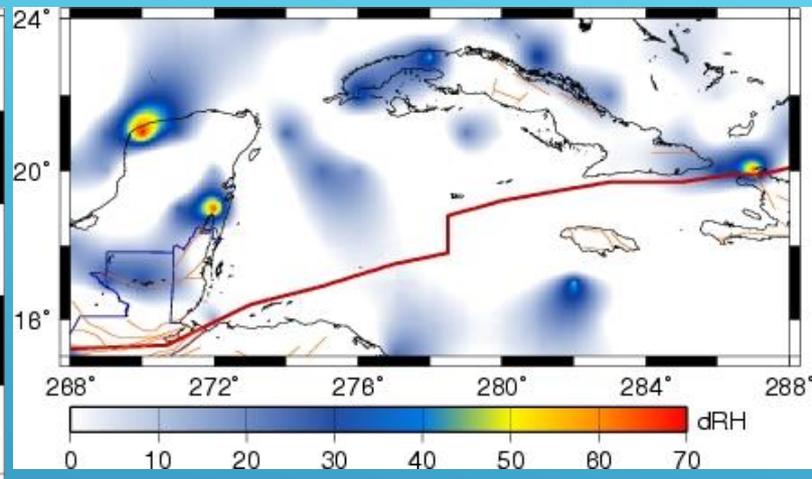
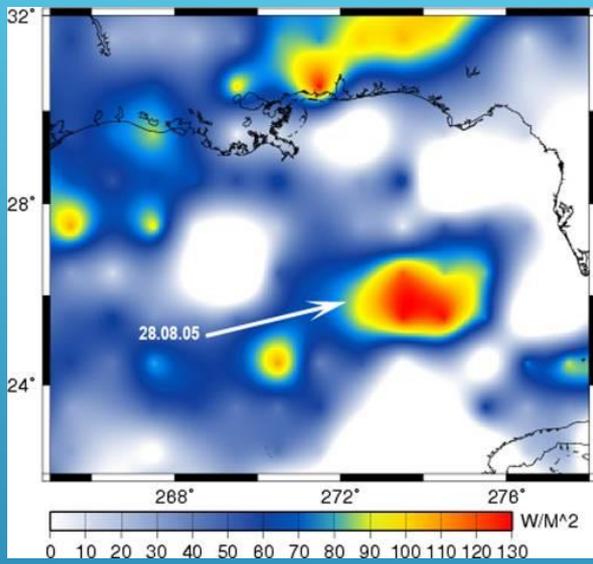
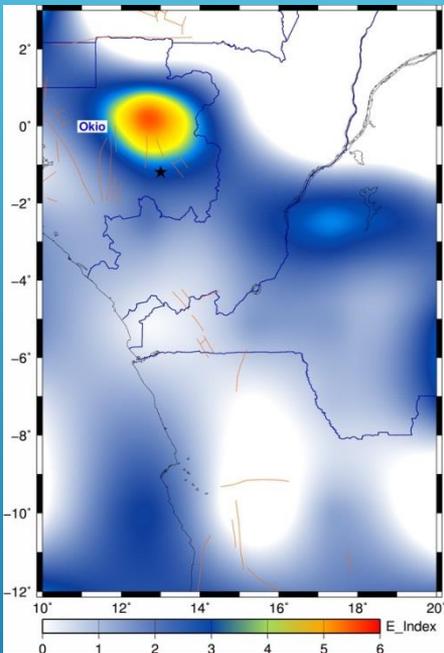
8%

# ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС АТМОСФЕРЫ



Earth's Energy Budget

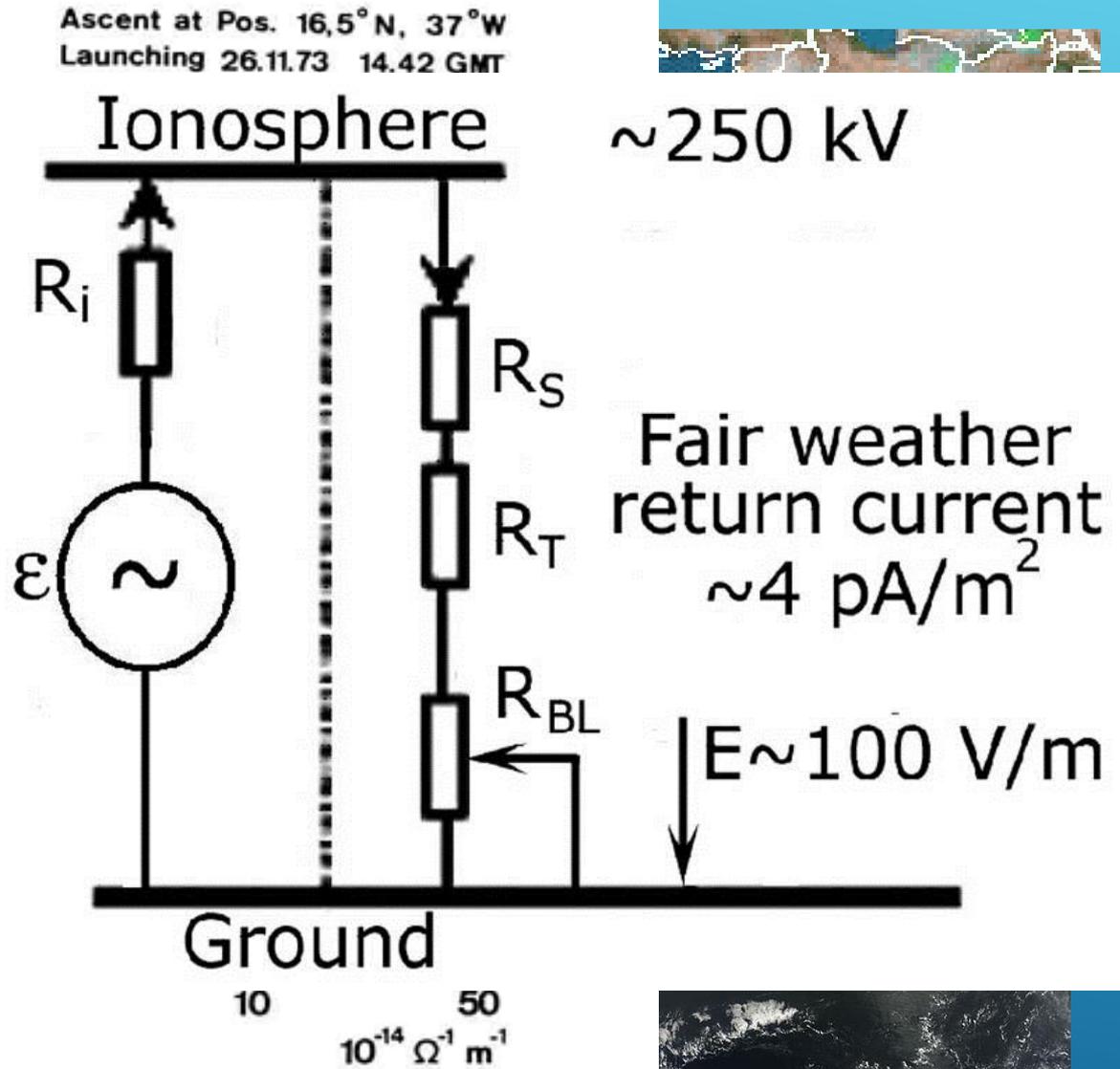
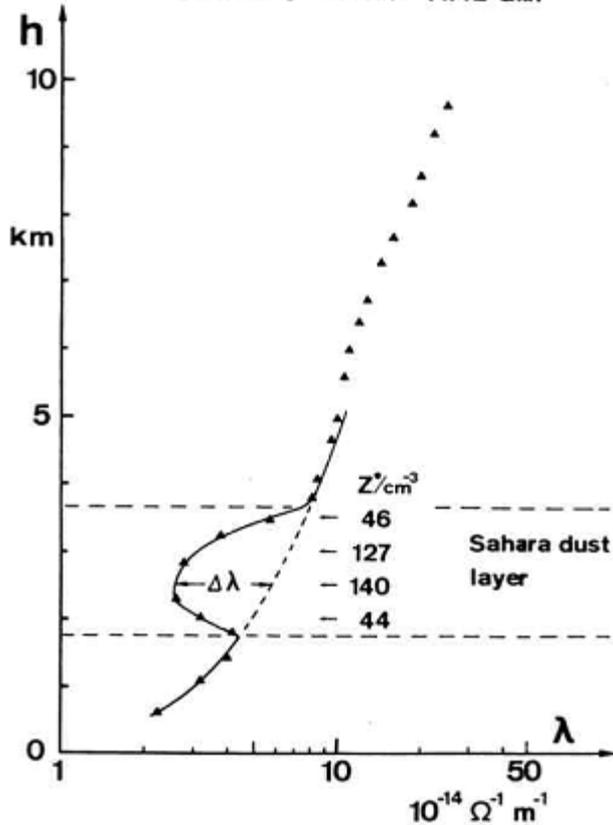
# ПРОВЕРКА ТЕПЛОЙ ВЕТВИ МОДЕЛИ НА РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКАХ ИОНИЗАЦИИ



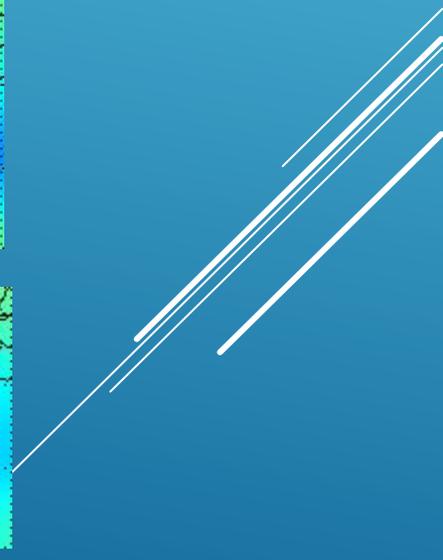
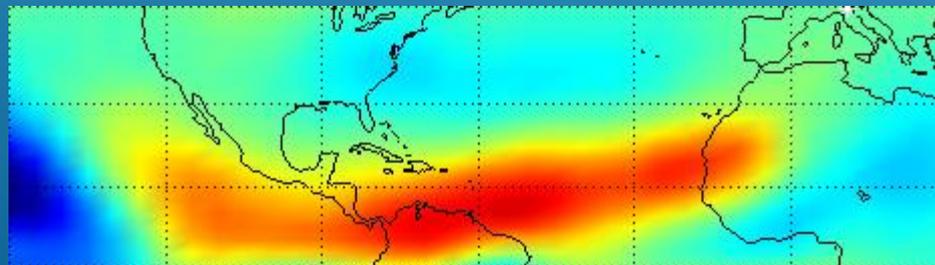
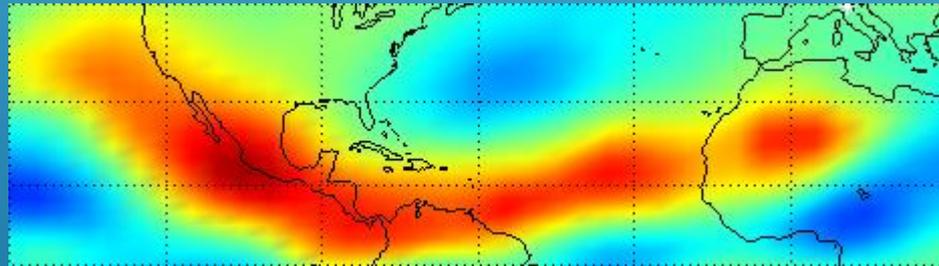
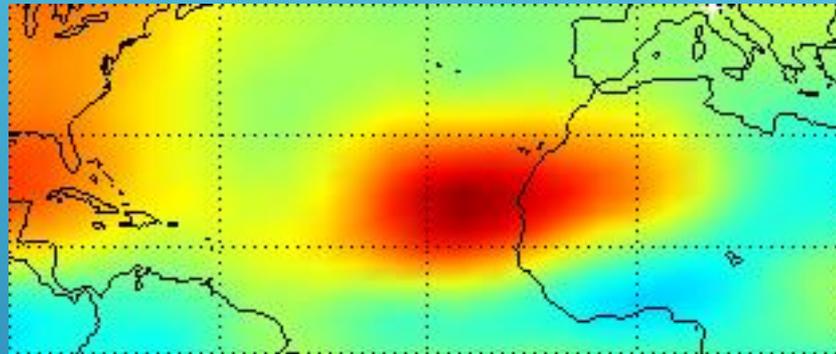
# ИЗМЕНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВО ВРЕМЯ ПЕСЧАНЫХ БУРЬ



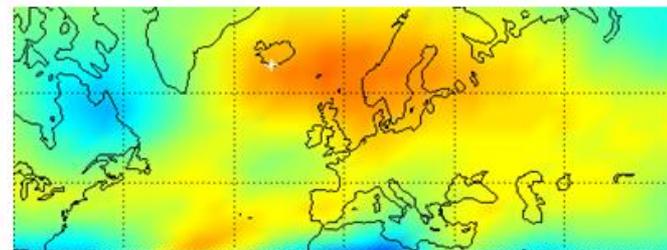
Ascent at Pos. 16,5° N, 37° W  
 Launching 26.11.73 14.42 GMT



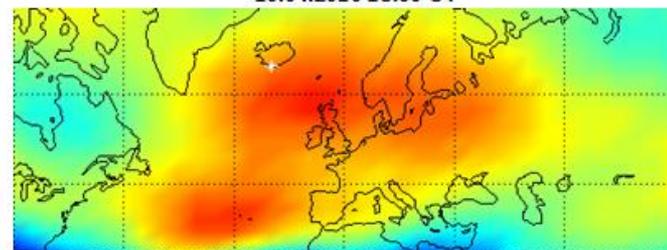
# ПРОВЕРКА ИОНОСФЕРНОЙ ВЕТВИ МОДЕЛИ НА ДРУГИХ ИСТОЧНИКАХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ АТМОСФЕРЫ



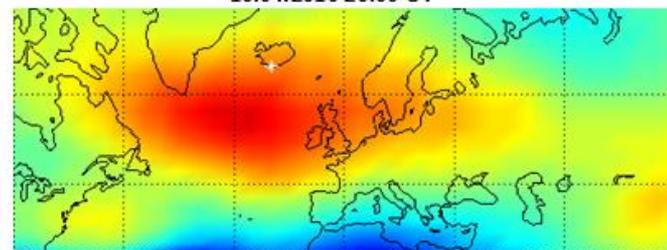
# ИОНОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА В ИСЛАНДИИ В 2010 Г.



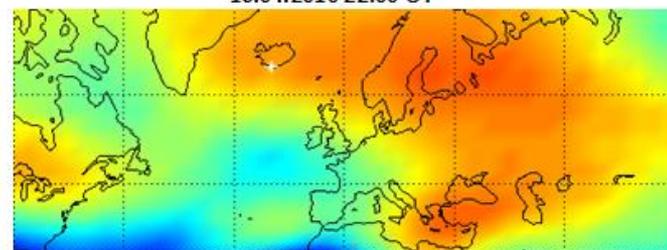
16.04.2010 18:00 UT



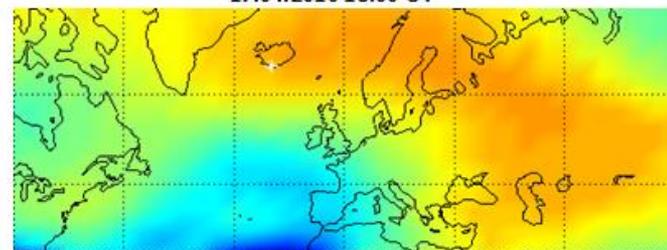
16.04.2010 20:00 UT



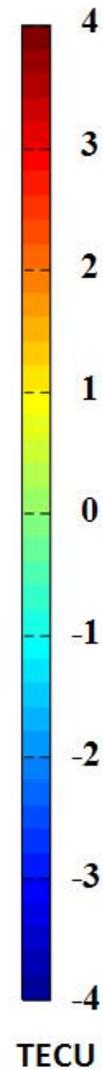
16.04.2010 22:00 UT



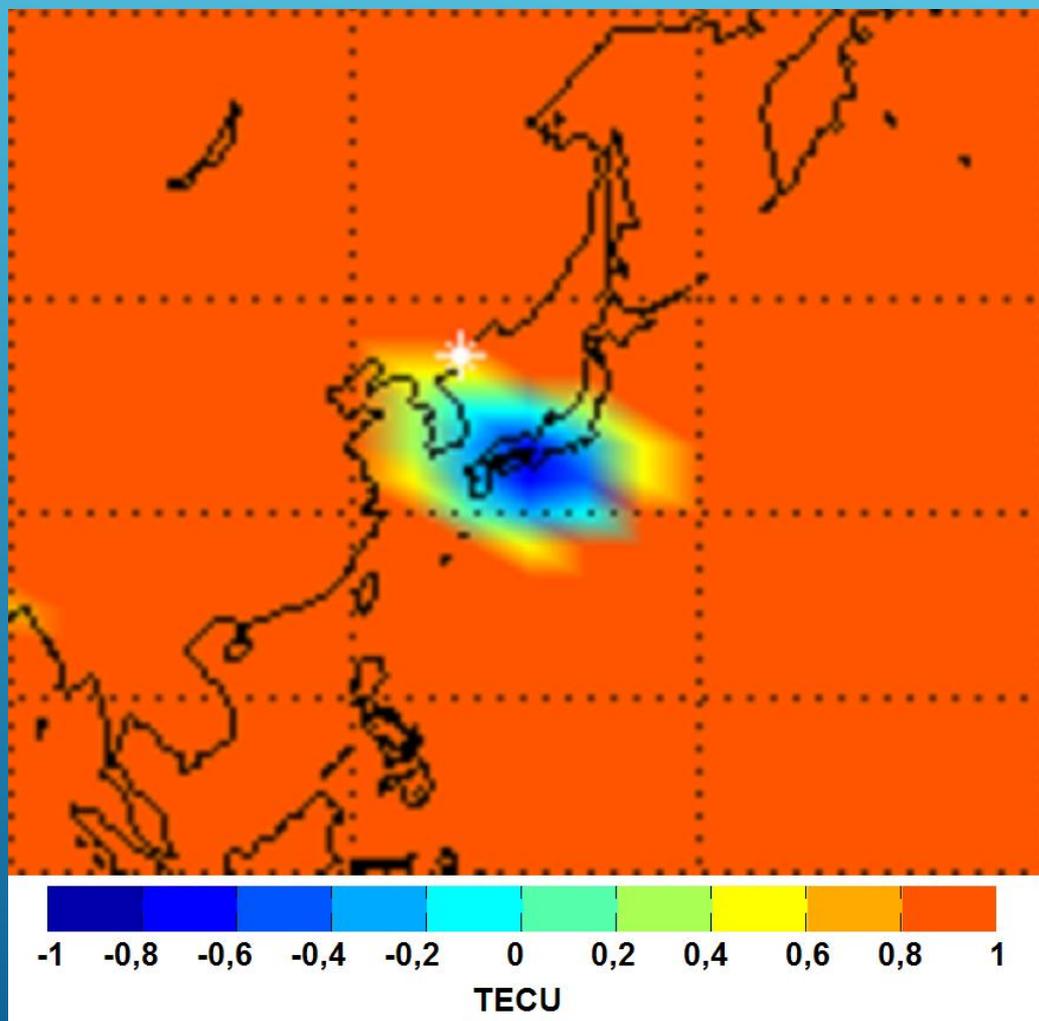
17.04.2010 18:00 UT



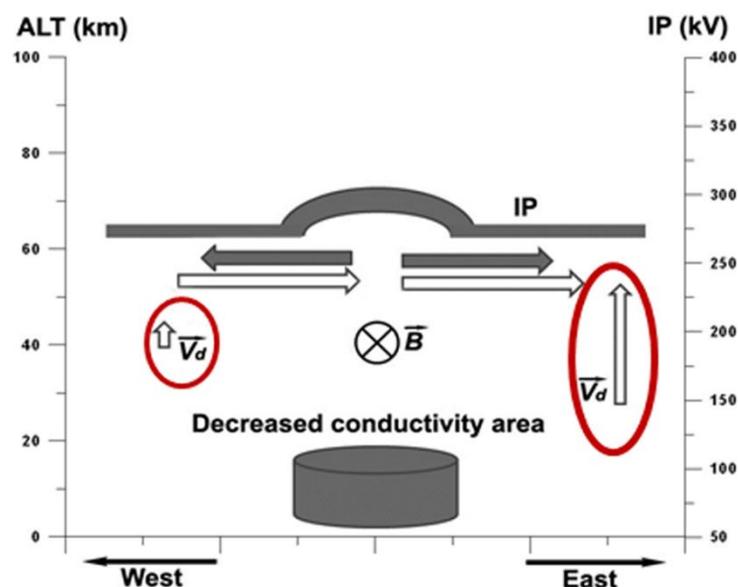
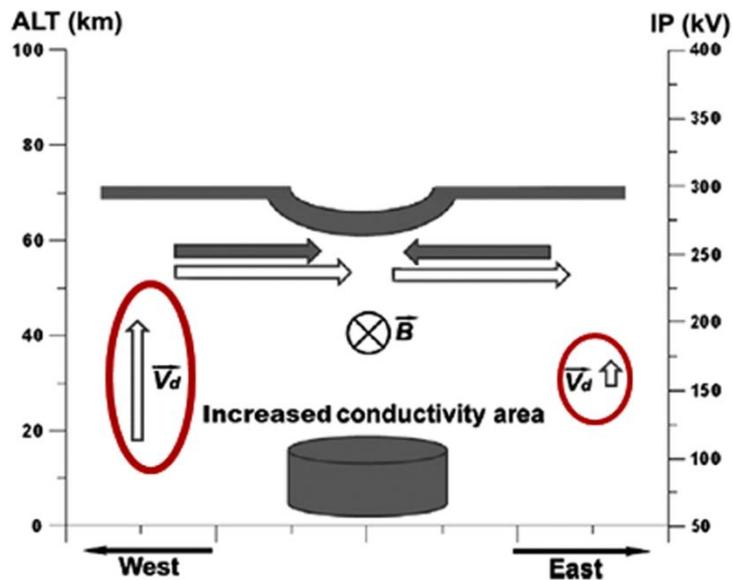
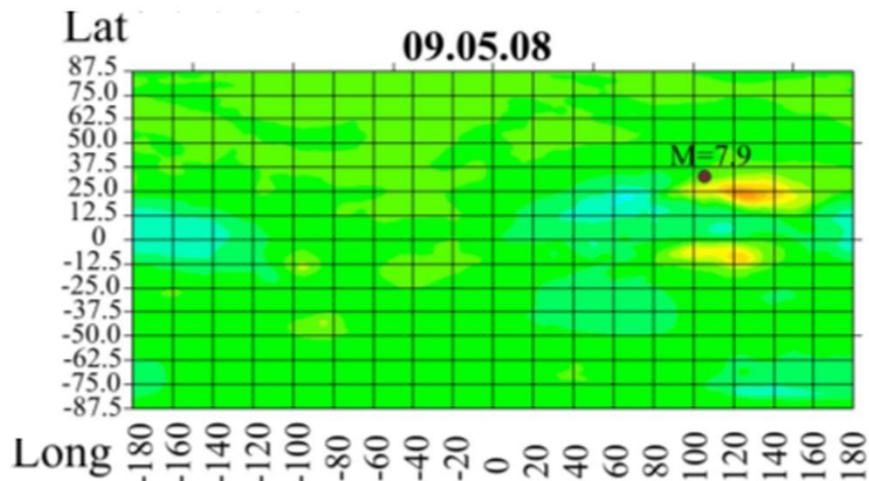
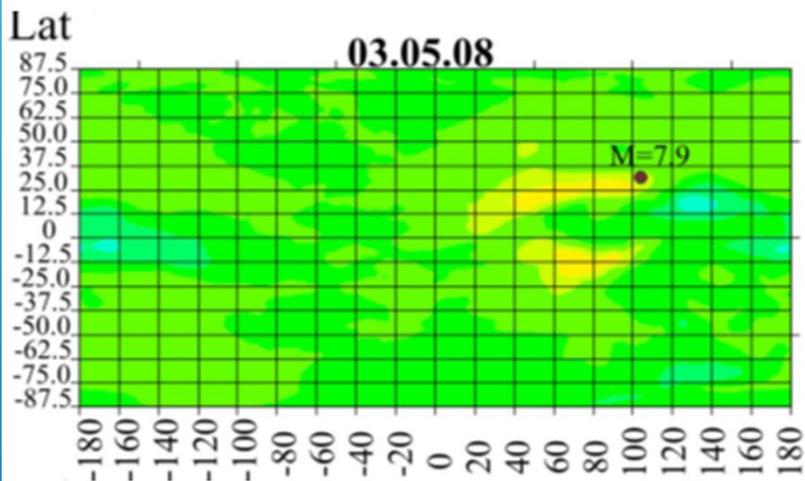
18.04.2010 18:00 UT



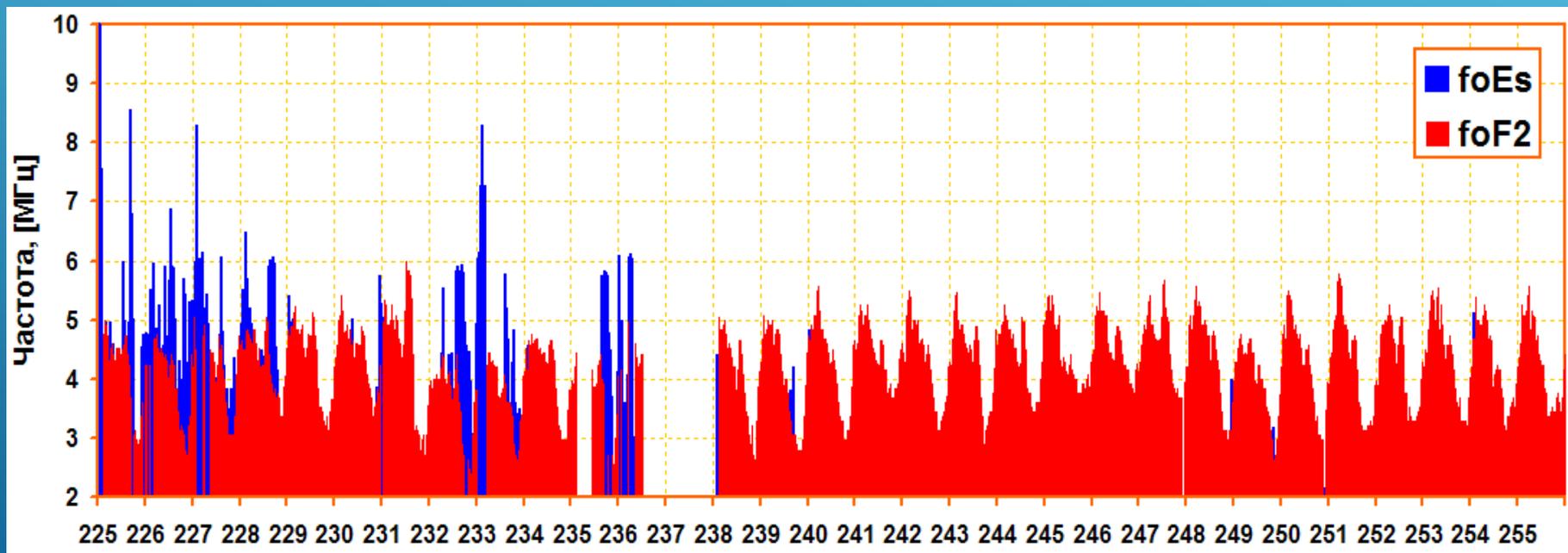
# ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ИОНОСФЕРНАЯ АНОМАЛИЯ ПОСЛЕ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ



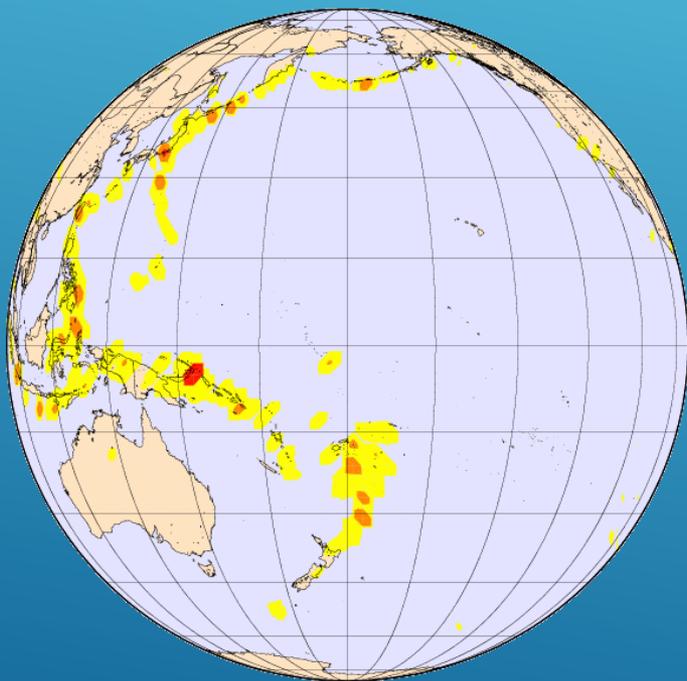
# ИОНОСФЕРНЫЕ АНОМАЛИИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В НИЗКИХ И ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ



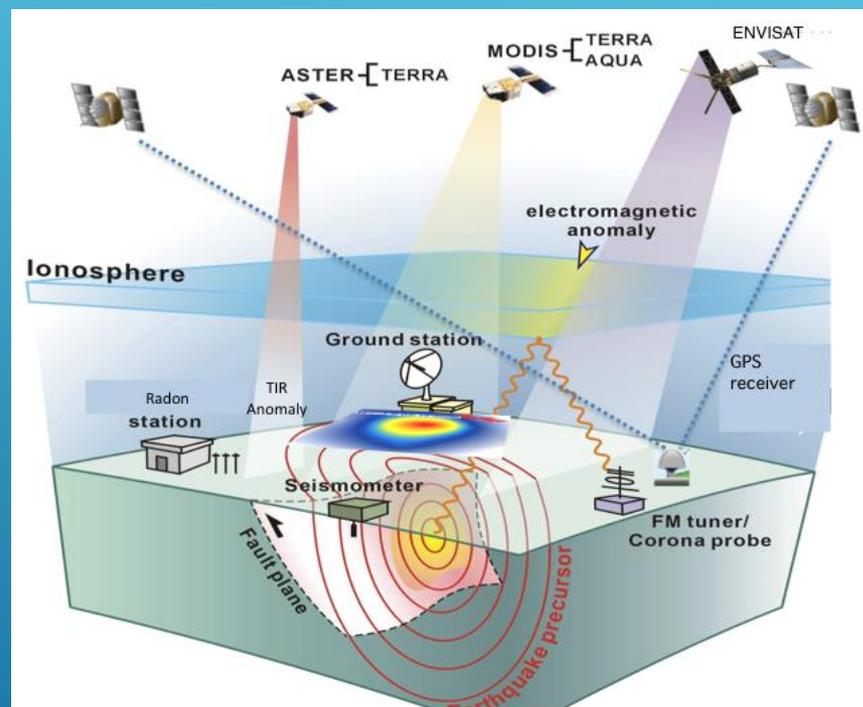
# РОЛЬ СПОРАДИЧЕСКОГО E-СЛОЯ В КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



# МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД



Глобальная карта горячих пятен (John Rundle)



Сетевой подход - многопараметрический анализ предвестников

# ПРЕИМУЩЕСТВО СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Что это?



Точечные наземные измерения не позволяют получать интегральную картину процесса

# Методология -> Как мы определяем аномалию

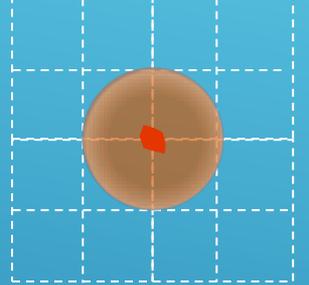
Данные со спутников

Среднее многолетнее поле

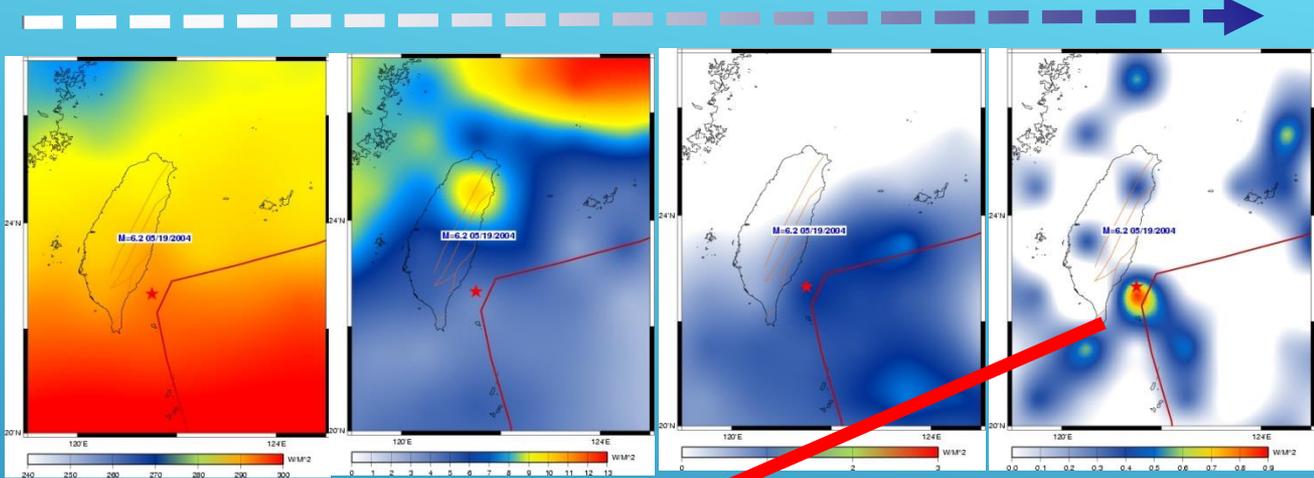
Статистический разброс

Обнаружение аномалии

Определение теплового пятна



Критерий Фишера



Где аномалия?

Реализация

$V_{ref}(r)$   
 $\pm n\sigma(r)$

Базовое поле

Аномалия

Уровень принятия решения

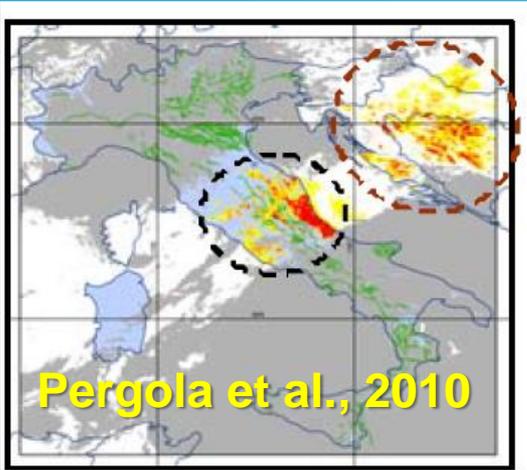
$$T_a(\mathbf{r}, t) = T_{ref}(\mathbf{r}, t')(-/+)\sigma_{\Delta T}(\mathbf{r})$$

Время [годы]

after Tramutoli (2007)

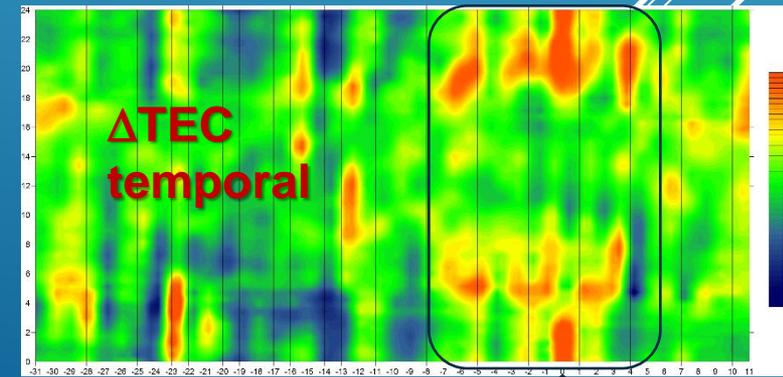
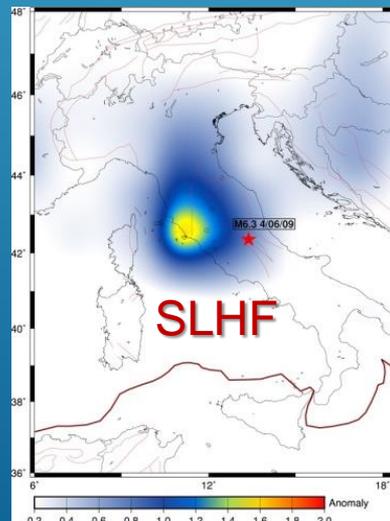
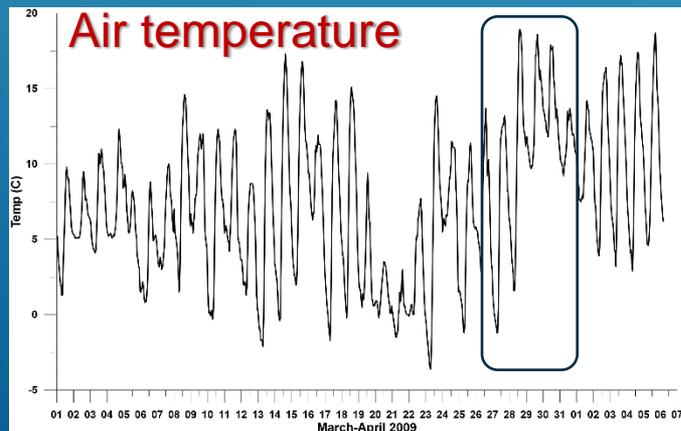
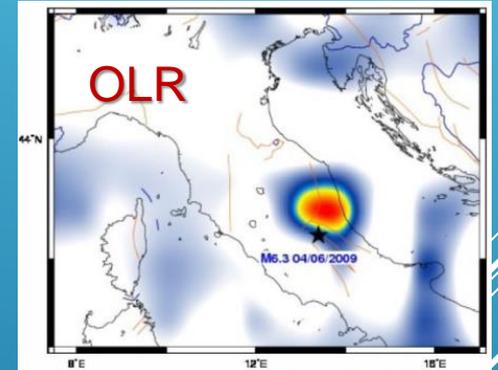
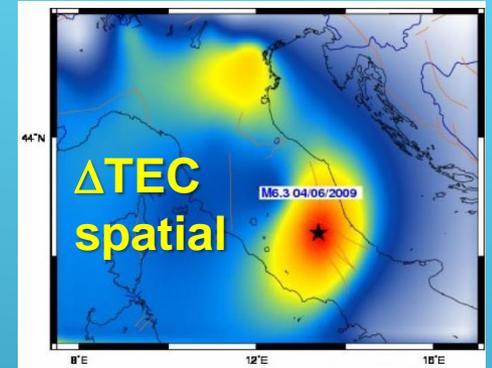
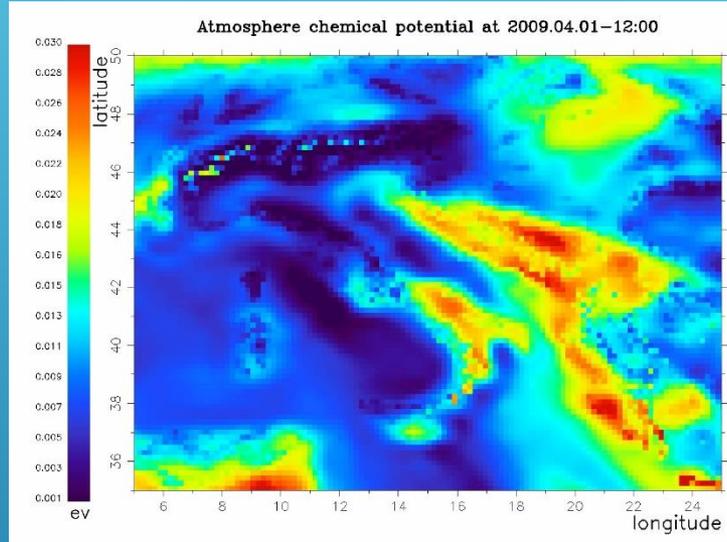


# ATMOSPHERIC/IONOSPHERIC PRE-EARTHQUAKE ANOMALIES ARE NO DOUBTS



Pergola et al., 2010

30 March 2009  
01:10:00 GTM



# ЗОНА ПОДГОТОВКИ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В АКВИЛЕ М6.3



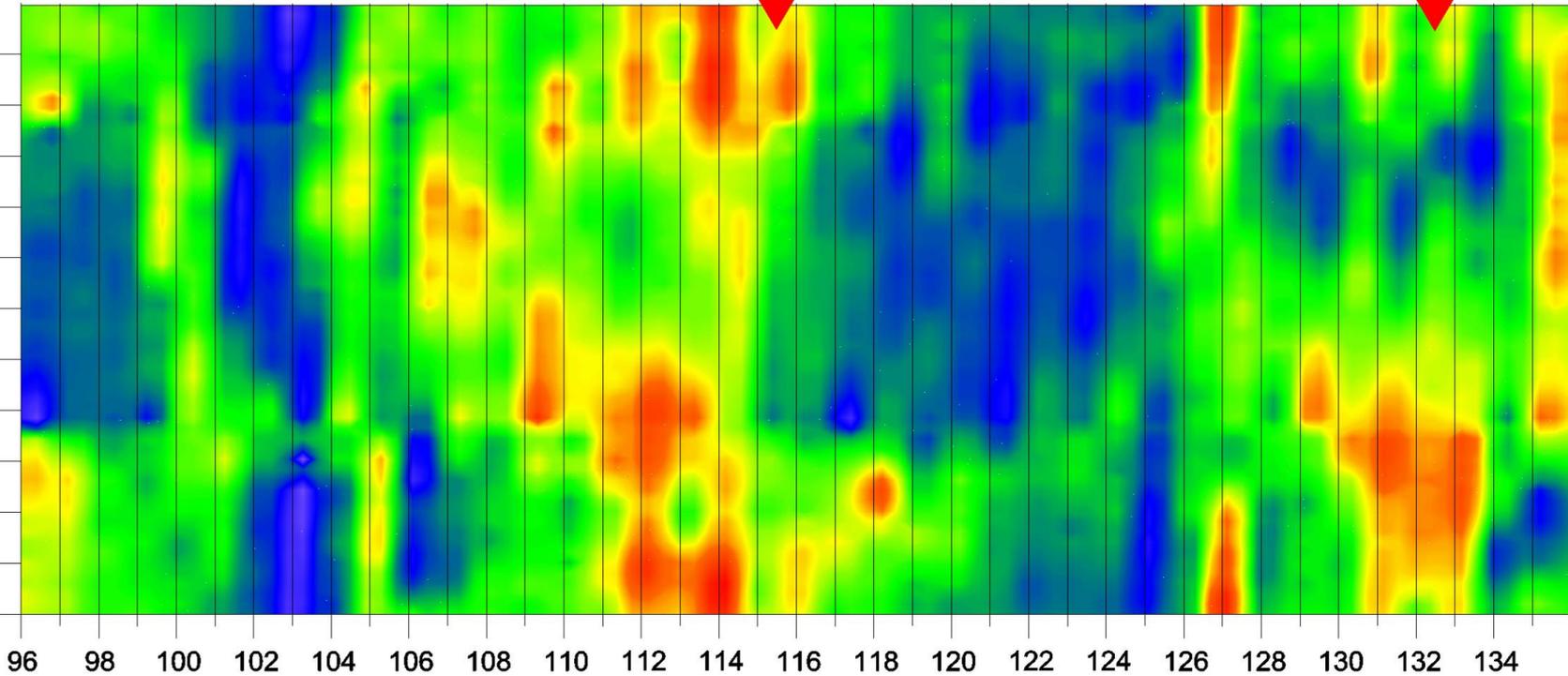
GPS/GLONASS receiver lhaz

M7.8

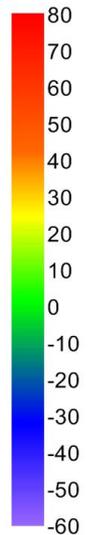
M7.3

LT

22  
20  
18  
16  
14  
12  
10  
8  
6  
4  
2  
0



dTEC, %



DOY 2015

96 98 100 102 104 106 108 110 112 114 116 118 120 122 124 126 128 130 132 134

# СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Time

March 31

April 1

April 2

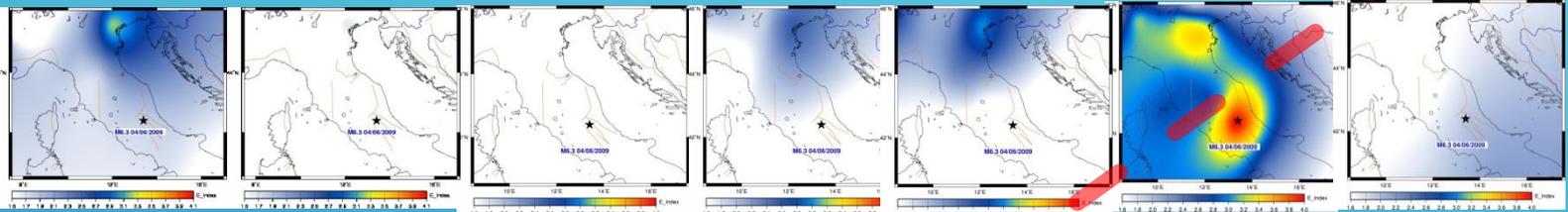
April 3

April 4

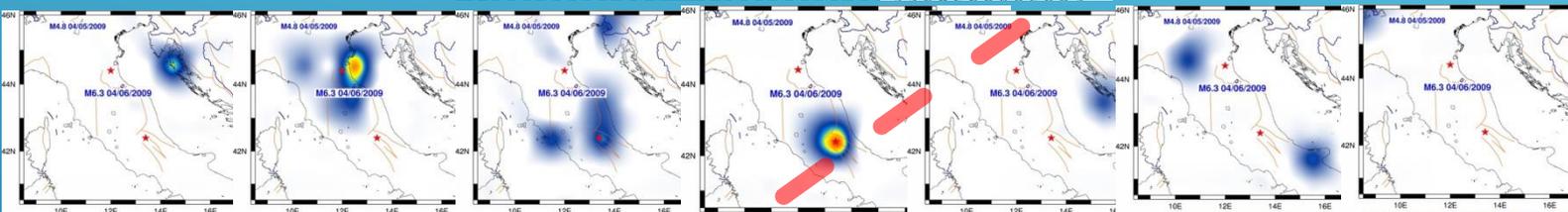
April 5

April 6

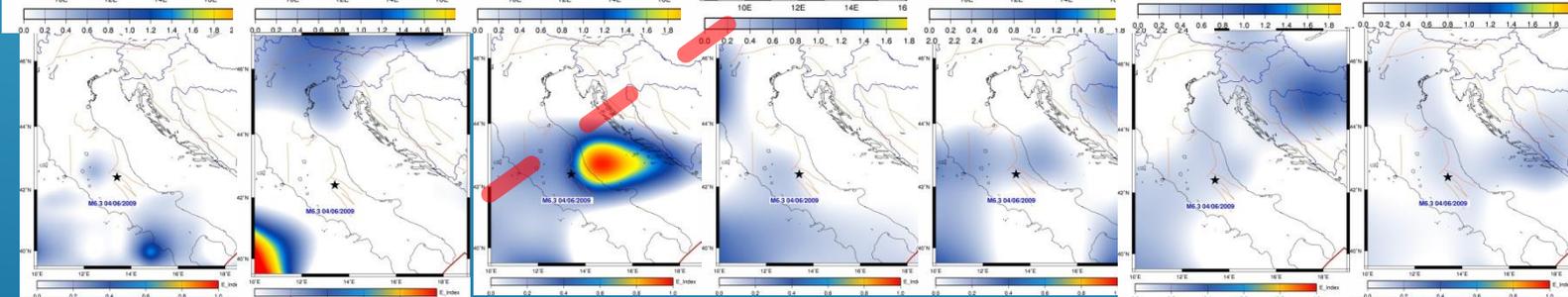
GPS/TEC



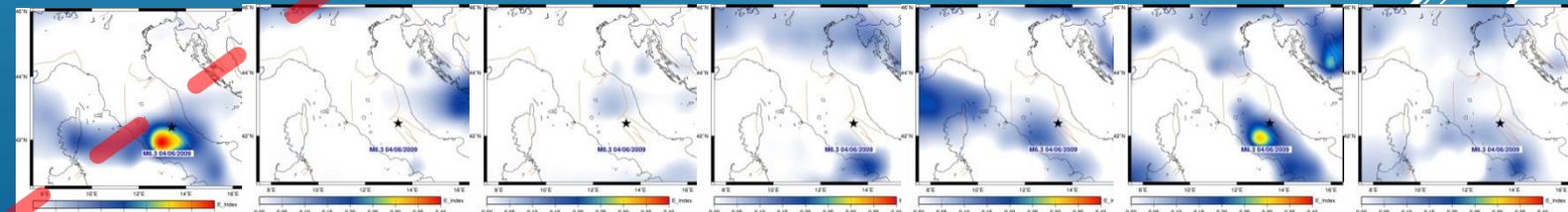
AIRS/  
CLROL



NOAA/  
AVHRR



NCEP  
Surface  
Temp



## Forecasting results for M7+(September 2012 – October 2013)

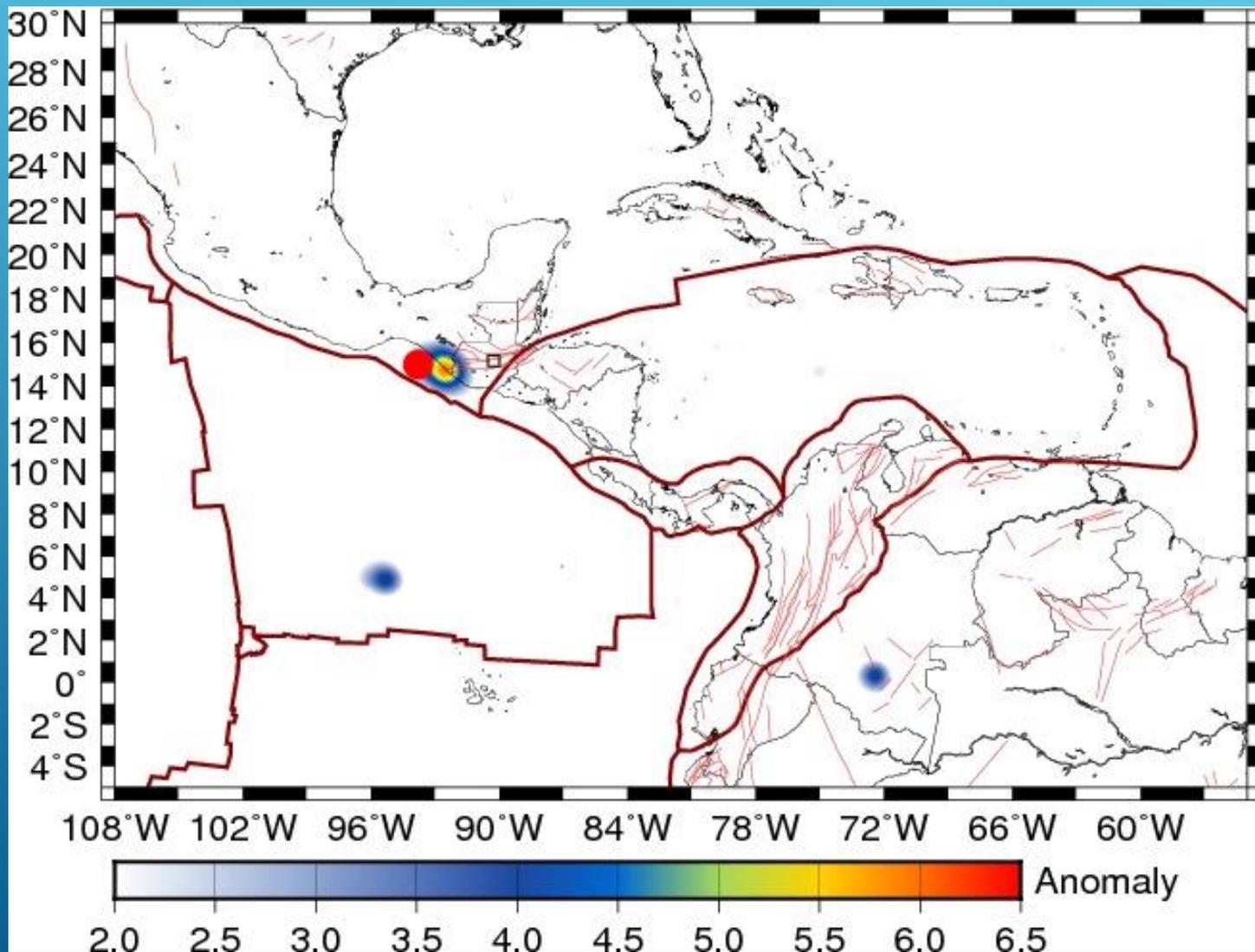
**20 global events, 14 forecasted**

6 non-forecasted: 2–very deep (>350km), 2- out of monitoring areas, 2 - missed

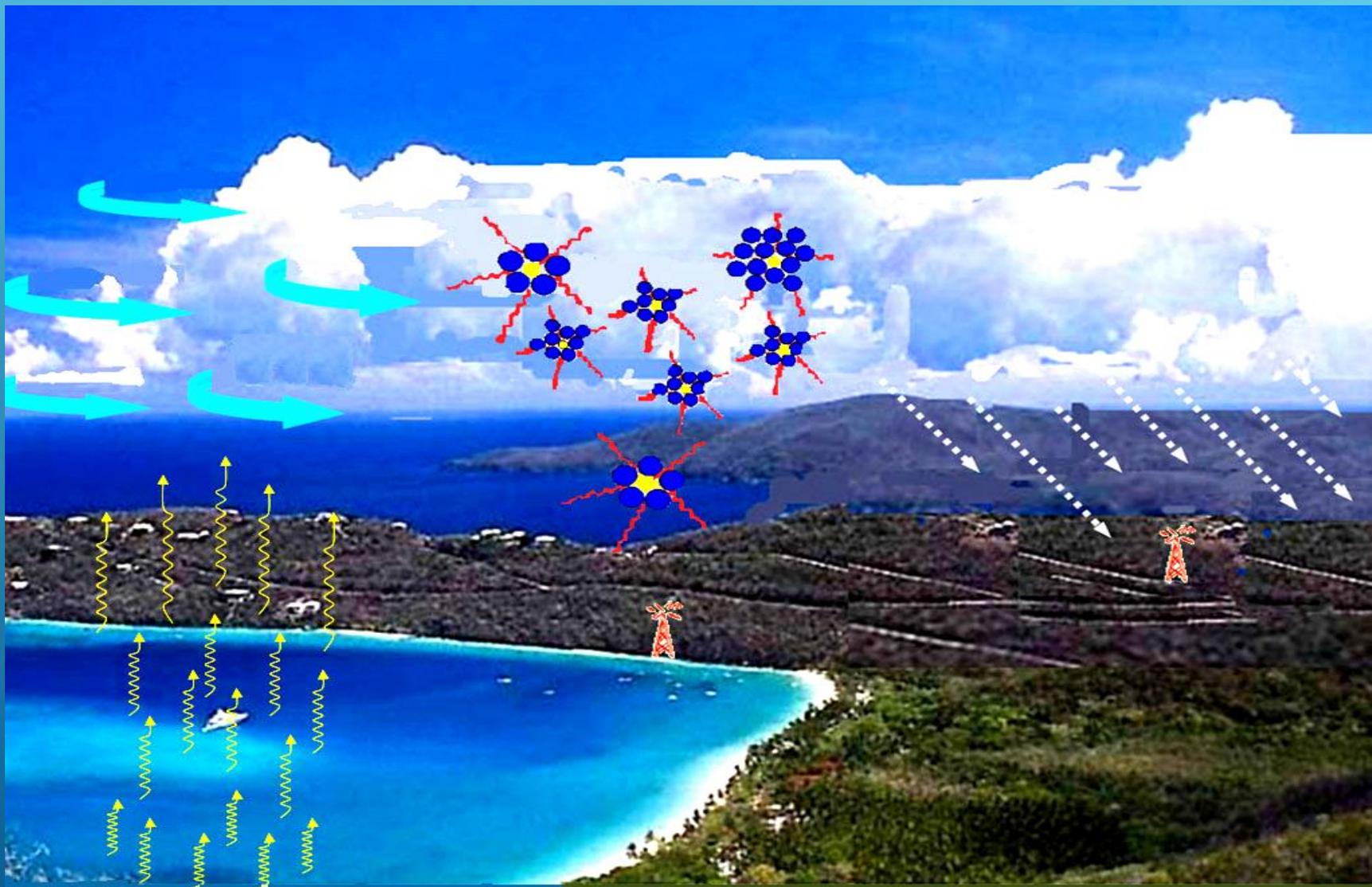
Earthquake Catalog					Earthquake forecast				
#	Date	M	Region	Location	Date of Forecast	Forecasted Region	Forecasted Location	Estimated M	Lag (Days)
1.	2012-09-05	7.6	Costa Rica	10.16N/85.39W	2012-08-05	Costa Rica	10N/85W	M6	30
2.	2012-12-30	7.2	Colombia	2N/76W	2012-9-17	Colombia	5N/73W	M5.5+	12
3.	2012-10-28	Mwp 7.7	Queen charlotte islands	52.8N/131.9W	2012-10-01	Canada- Vancouver Island	48N/131W	M5.5+	27
4.	2012-11-07	Mww 7.4	Guatemala	14.1S/91.9W	2012-10-14	Guatemala	16S/90W	M6+	23
5.	2012-12-07	Mwp 7.3	Honshu, japan	37.9N/144.1E	2012-11-22	Japan- off coast of Honshu	35N/145E	M6.5+	14
6.	2012-12-10	Mwb 7.1	Banda sea	6.5S/129.8E	2012-12-03	Indonesia- Banda Sea	5S/127E	M6.5+	7
7.	2013-01-05	Mwp 7.7	Southeastern Alaska	55.3N/134.7W	2012-12-05	Northern Canada- Queen Charlotte	53N/132W	M6+	29
8.	2013-02-09	7	Colombia	1.17N/77.41W	2003-01-16	Colombia	3N/75W	M5.5+	23
9.	2013-04-06	7	Papua	3.54S/138.46E	2013-03-27	Papua, Indonesia	2S/138E	M6+	10
10.	2013-04-19	7.2	Kuril islands	46.26N/150.85E	2013-03-20	Kurils	44N/149E	M6+	29
11.	2013-08-30	7	Andreanof islands	51.79N/175.24W	2013-07-23	Aleutian, Alaska	50N/178W	M6+	36
12.	2013-09-24	7.7	Pakistan	27.07E/65.56E	2013-09-18	Pakistan	28.5N/70E	M6	6
13.	2013-09-25	7	Southern Peru	15.91S/74.63W	2013-09-06	Peru	17S/72W	M6+	19
14.	2013-10-25	7.1	Honshu, Japan	37.22N/144.69E	2013-10-14	Japan	37.5N/143E	M6.5+	11

All forecasts for M7+ are made with some accepted uncertainties : 1-45 day time interval, location within 2.5x2.5 degree box and M estimate within 1 step base (i.e. 6,5-7.5)

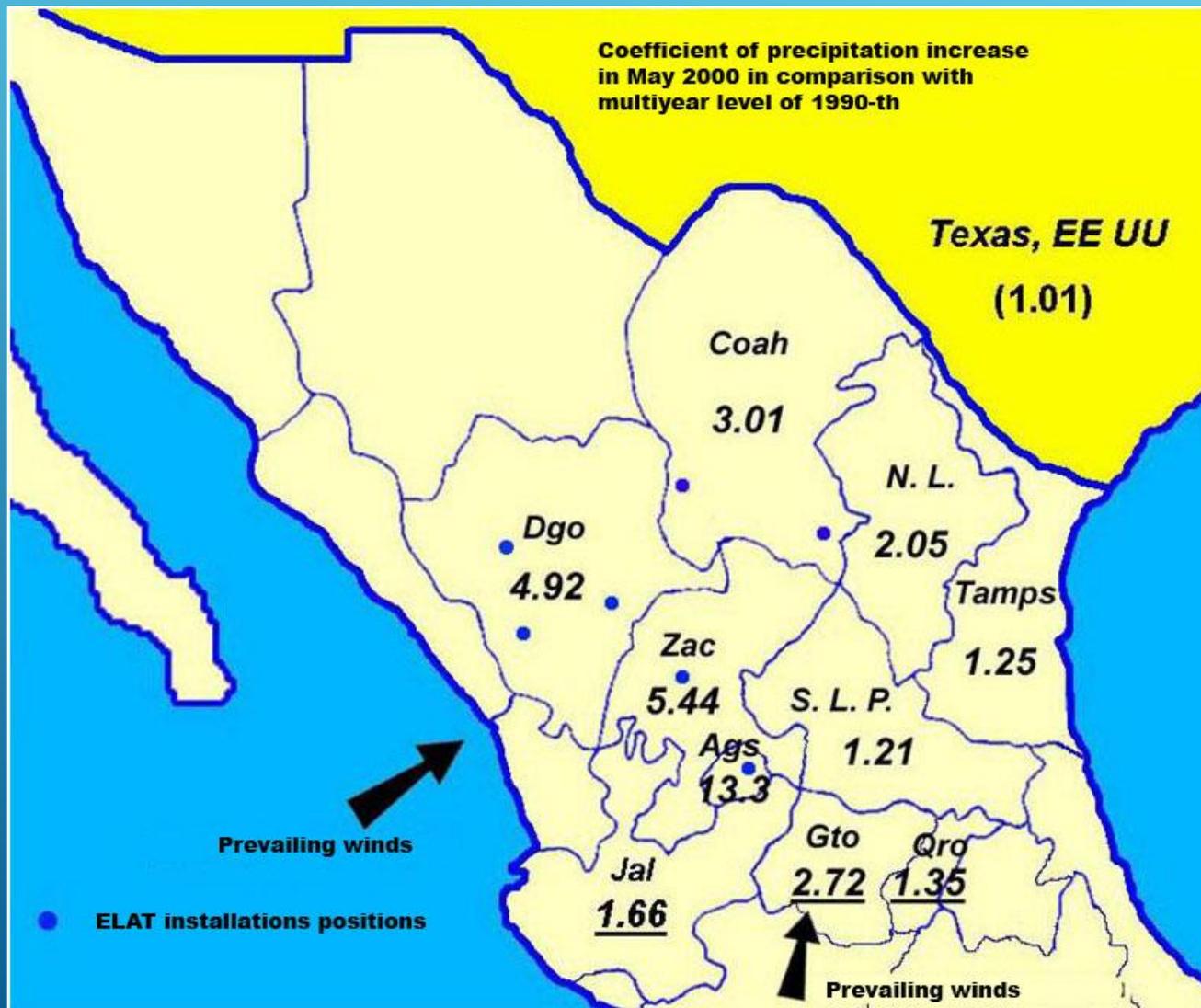
# ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ М8.1 В МЕКСИКЕ 8 СЕНТЯБРЯ 2017 (ПРЕДВЕСТНИК OLR 14 АВГУСТА)



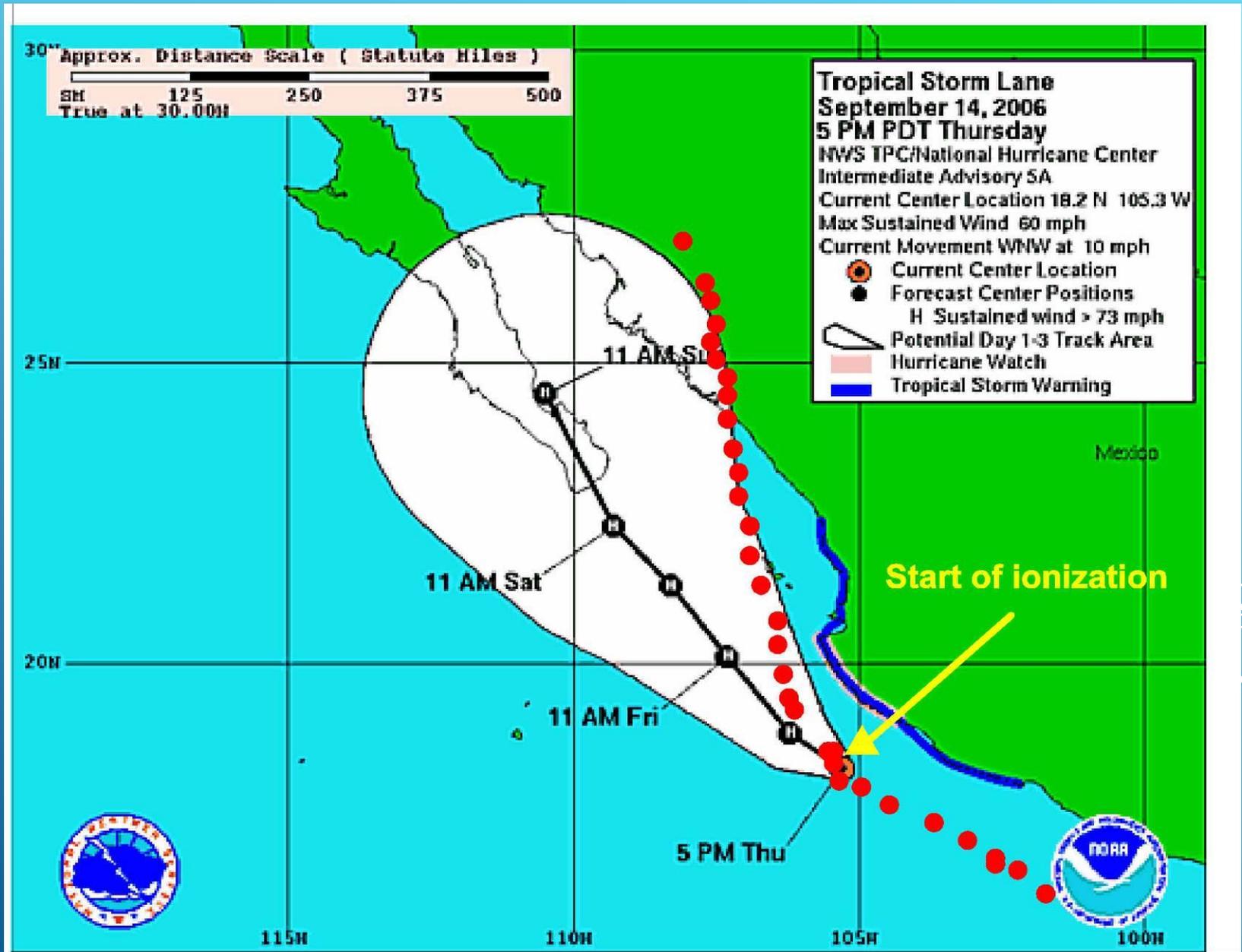
# С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗМОЖНО ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАКОВ И СТИМУЛИРОВАНИЕ ОСАДКОВ



# PRECIPITATION INCREASE IN MEXICO DUE TO ARTIFICIAL IONIZATION

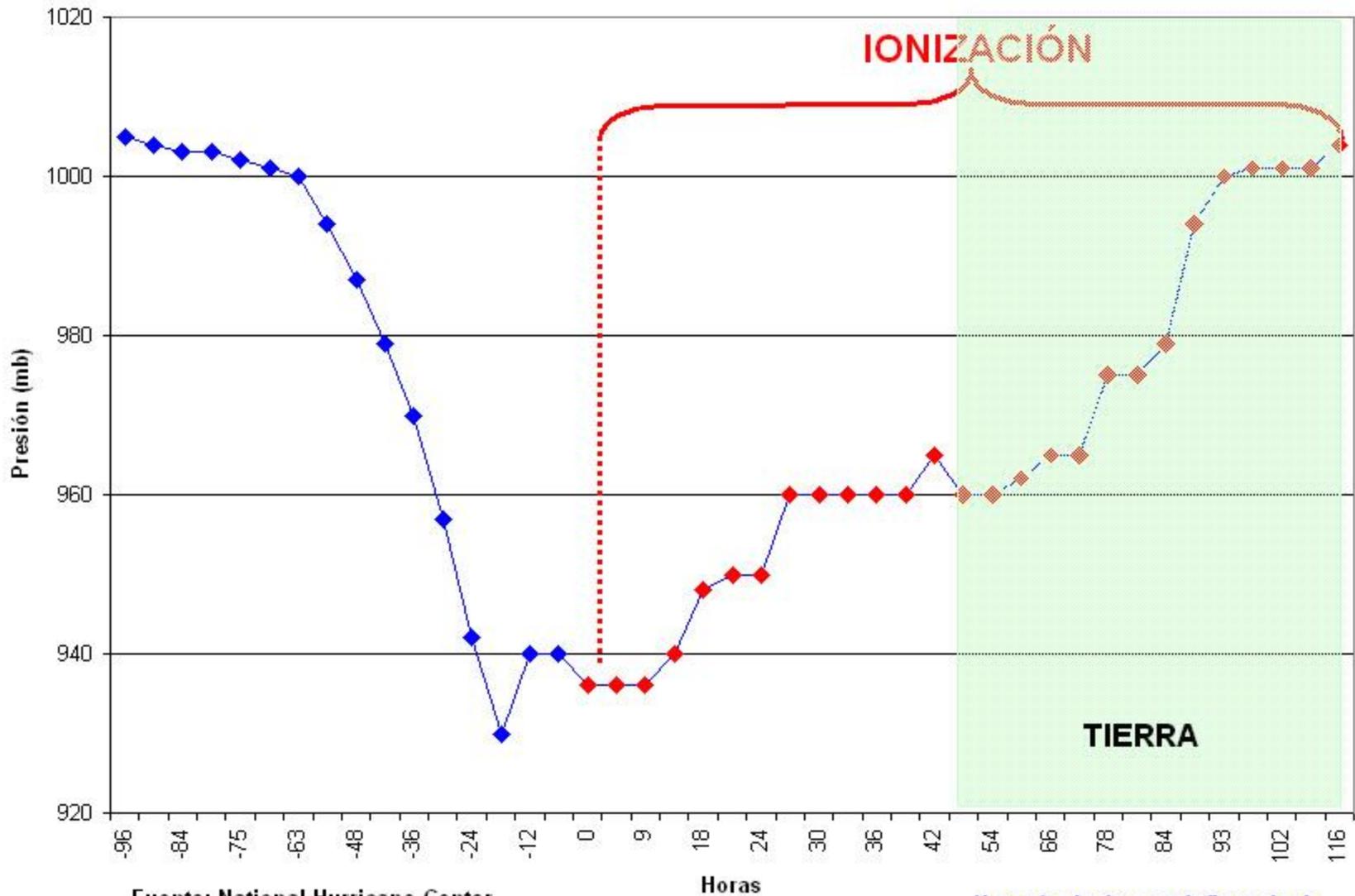


# CHANGING HURRICANE TRAJECTORY





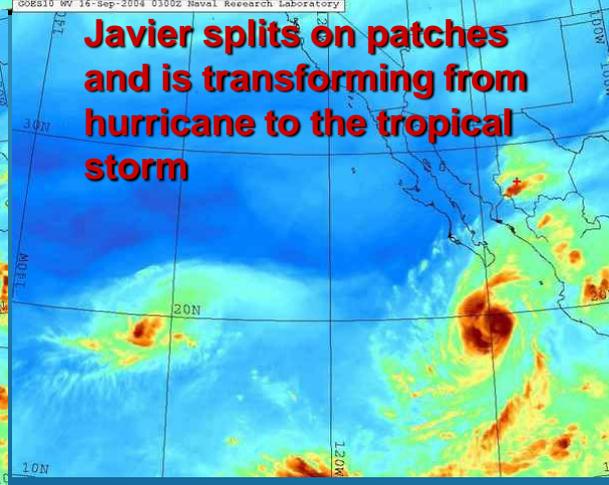
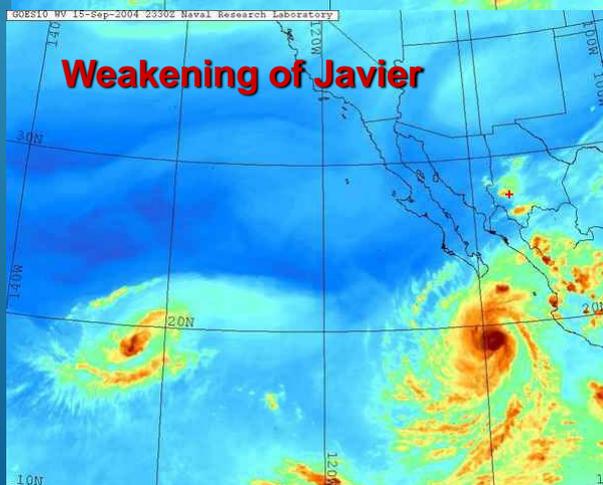
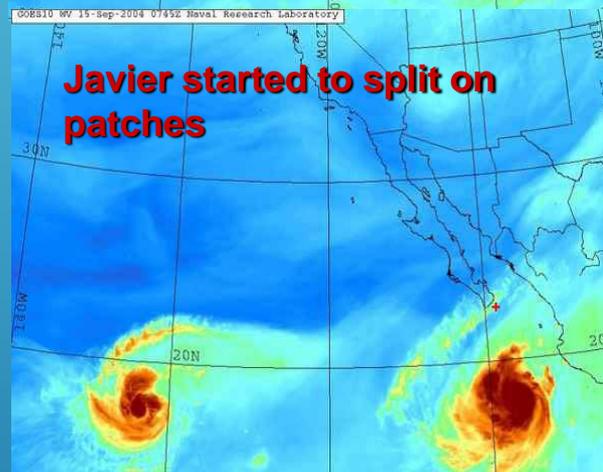
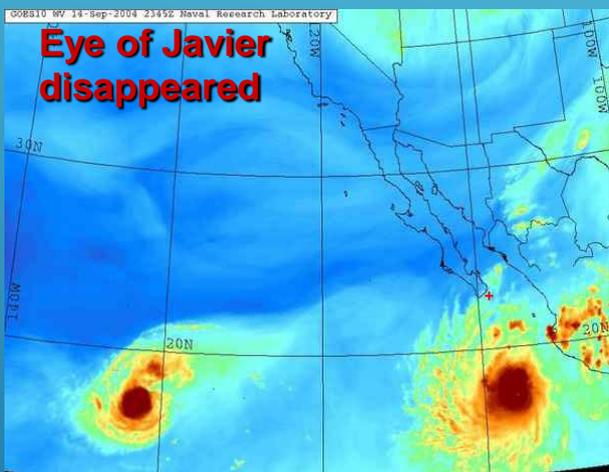
# HURACÁN JAVIER PRESIÓN BAROMÉTRICA 10 - 19 SEPTIEMBRE 2004



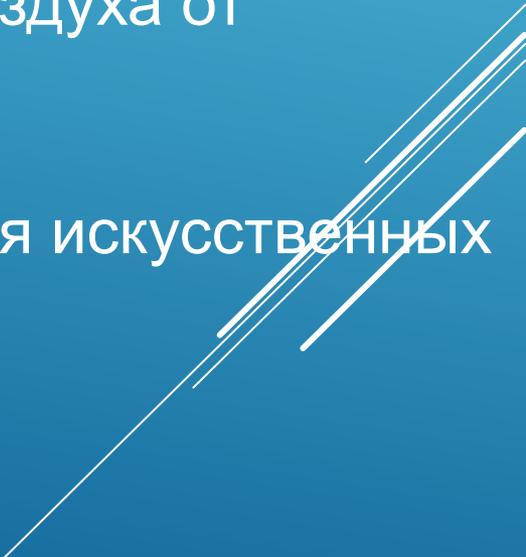
Fuente: National Hurricane Center  
Elaboró: ELAT - UNAM

Huracán Javier con influencia de  
ionización

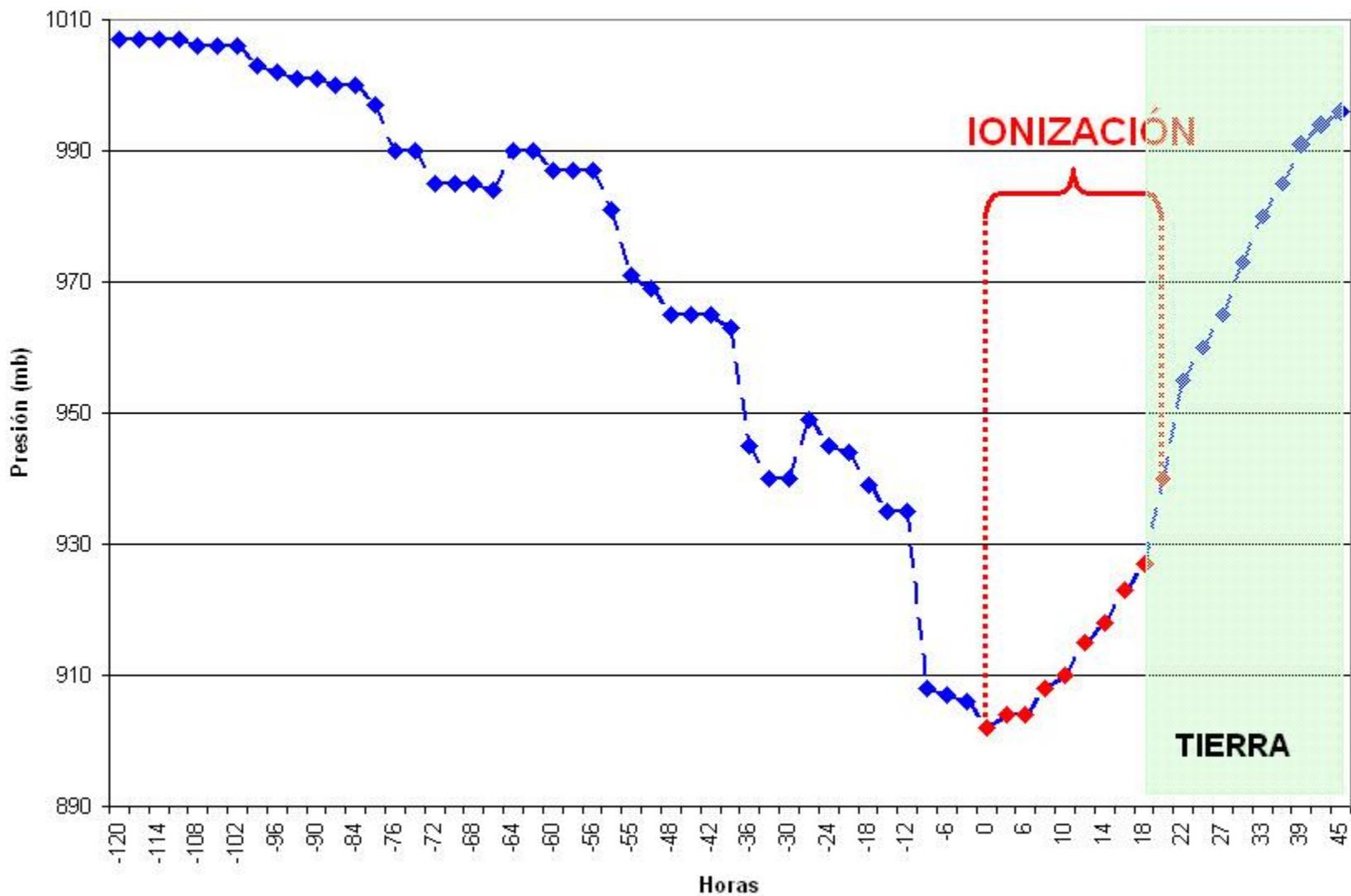
# FIGHTING WITH HURRICANE JAVIER



# ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ

- Гарантированные урожаи в областях сельскохозяйственного производства;
  - Повышение эффективности генерации энергии (наполнение резервуаров гидроэлектростанций, искусственный ветер для ветрогенераторов электричества);
  - Создание комфортных погодных условий в мегаагломерациях, очистка городского воздуха от аэрозолей и других загрязнений;
  - Защита аэропортов от туманов;
  - Борьба с лесными пожарами путем создания искусственных осадков;
  - Ослабление ураганов и торнадо;
  - Борьба с наводнениями и засухой путем перераспределения осадков
- 

# PRESIÓN BAROMÉTRICA HURACÁN KATRINA AGOSTO 23 - 31, 2005



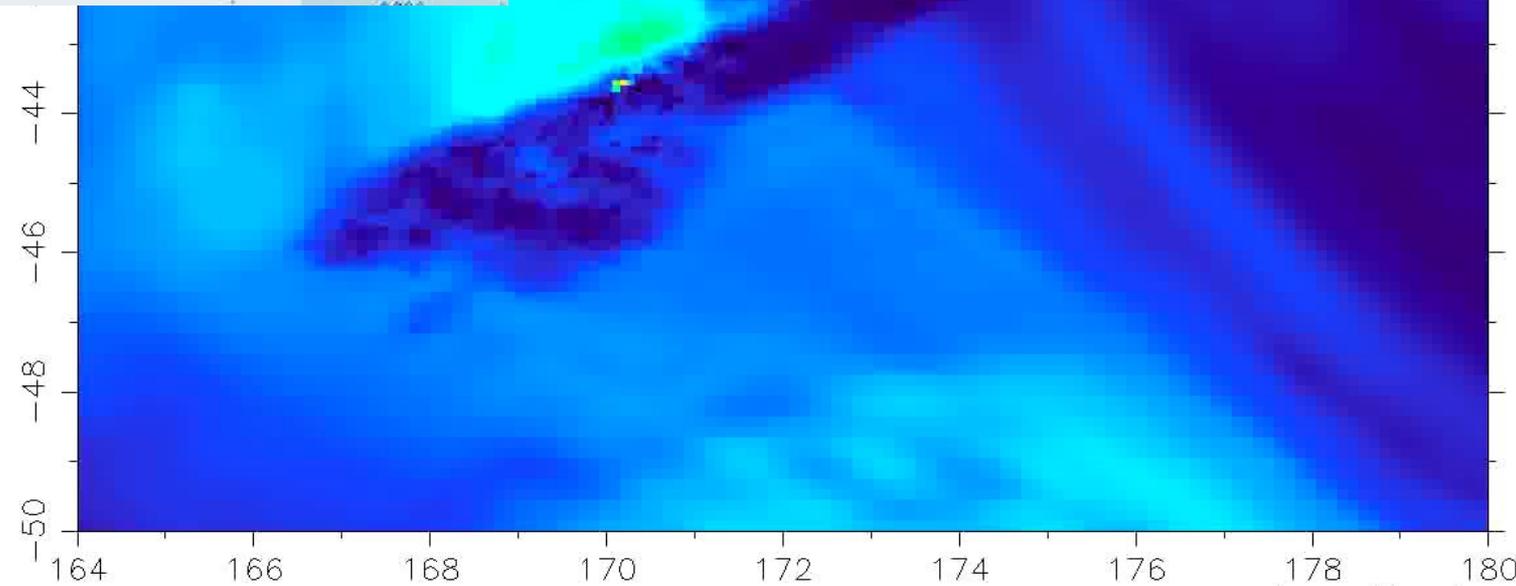
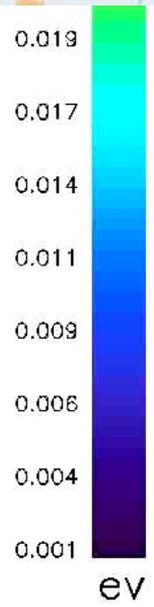
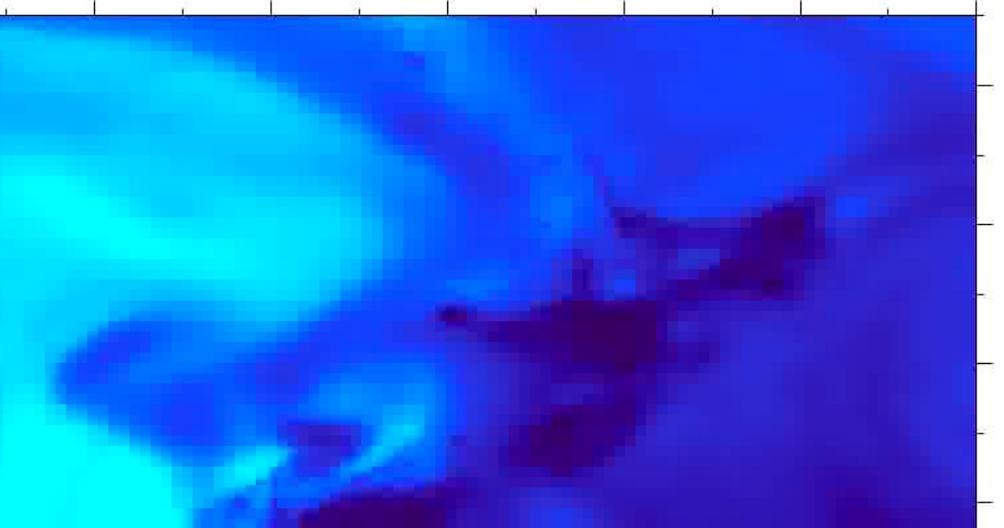
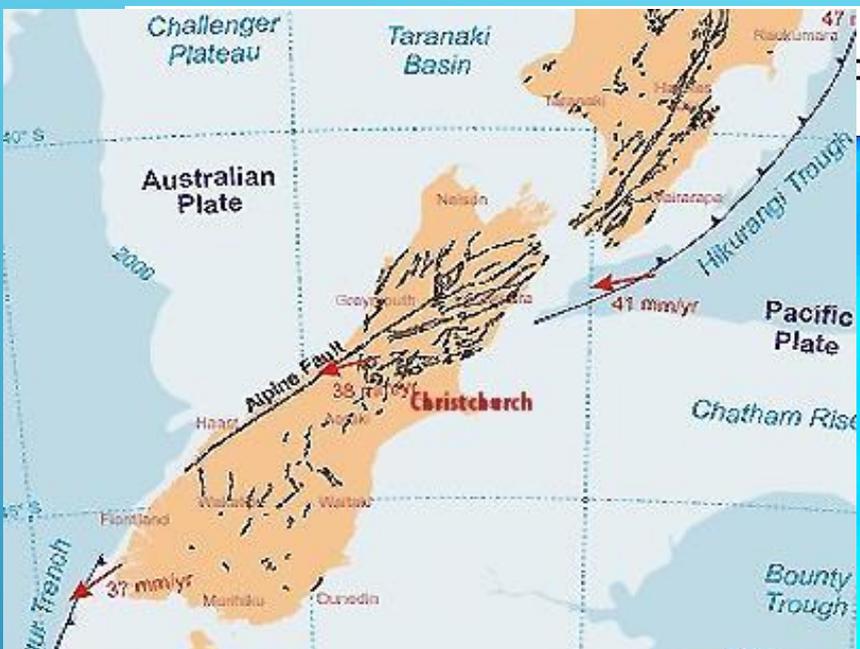
Fuente: National Hurricane Center  
Elaboró: ELAT - UNAM

Huracán Katrina con influencia de ionización

# ВЫВОДЫ

- ▶ Процессы ионизации вносят существенный вклад в термодинамику и электродинамику атмосферы
- ▶ Использование тепловых эффектов и эффектов воздействия на глобальную электрическую цепь позволяет проводить диагностику и прогноз различных природных и техногенных катастрофических явлений
- ▶ С помощью технологии искусственной ионизации возможно производить коррекцию погодных условий, в том числе экстремальных

# Chemical potential at 2013.07.14-00:00



longitude

# Atmosphere chemical potential at 2017.08.10-00:00

