



Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

# Численное моделирование распространения акустико-гравитационных волн, вызванных метеорологическими штормами в Калининградском регионе

Васильев П.А.<sup>1</sup>, Борчевкина О.П.<sup>1,2</sup>, Карпов М.И.<sup>1,2</sup>, Курдяева Ю.А.<sup>1</sup>,  
Карпов И.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Калининград (КФ ИЗМИРАН), Калининград, Россия

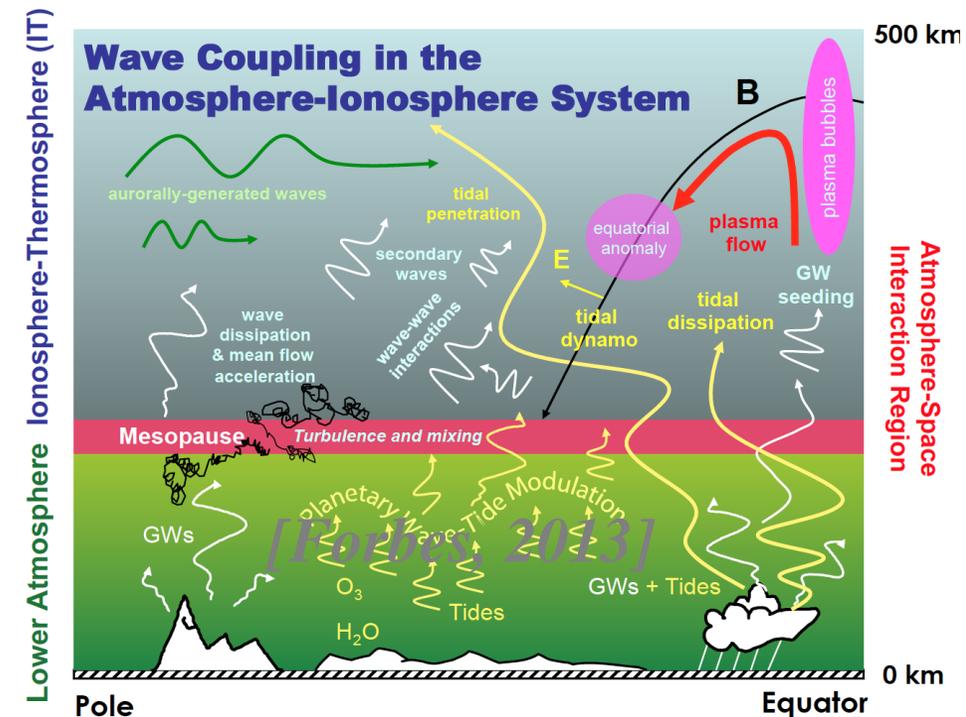
<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия

# Мотивация

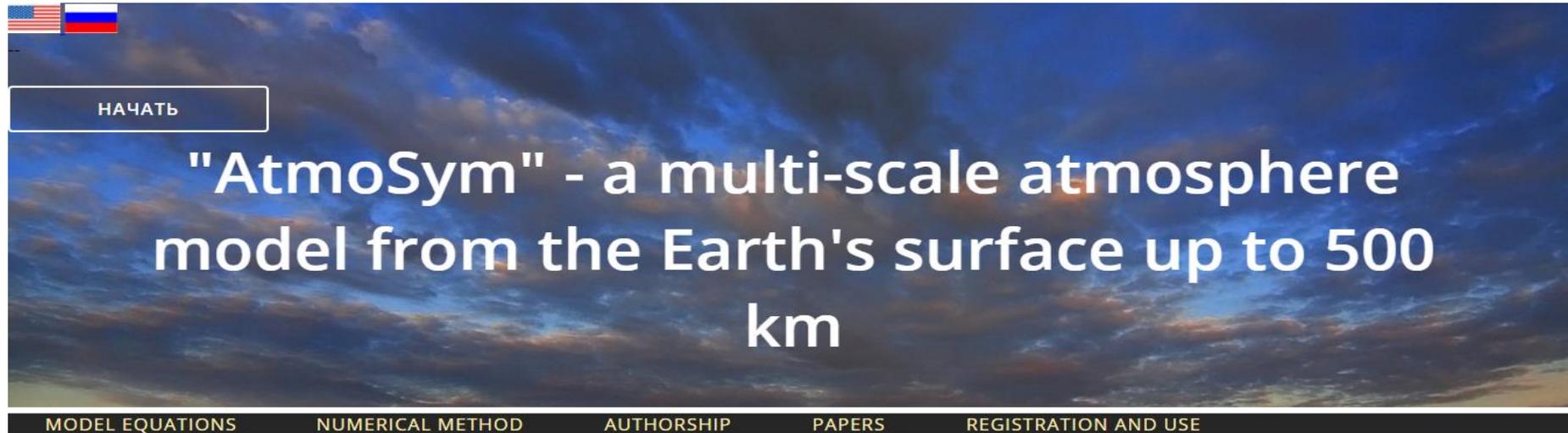
Анализ вкладов метеорологической активности в общую ионосферную возмущенность исследуются с помощью различных методов, которые дают близкую оценку вклада от метеорологических возмущений составляет порядка ~15–35% от всех факторов изменчивости ионосферы при спокойной геомагнитной обстановке.

В моделях верхней атмосферы/ионосферы основное место занимали электродинамические и химические процессы, в то время как связи с процессами в нижних слоях атмосферы традиционно реализовывались в простых приближенных формах.

Цель работы являлось продолжение исследований механизмов формирования ионосферных возмущений, вызываемых локальными термосферными источниками, и выявление наиболее важных факторов, определяющих реакцию ионосферы.



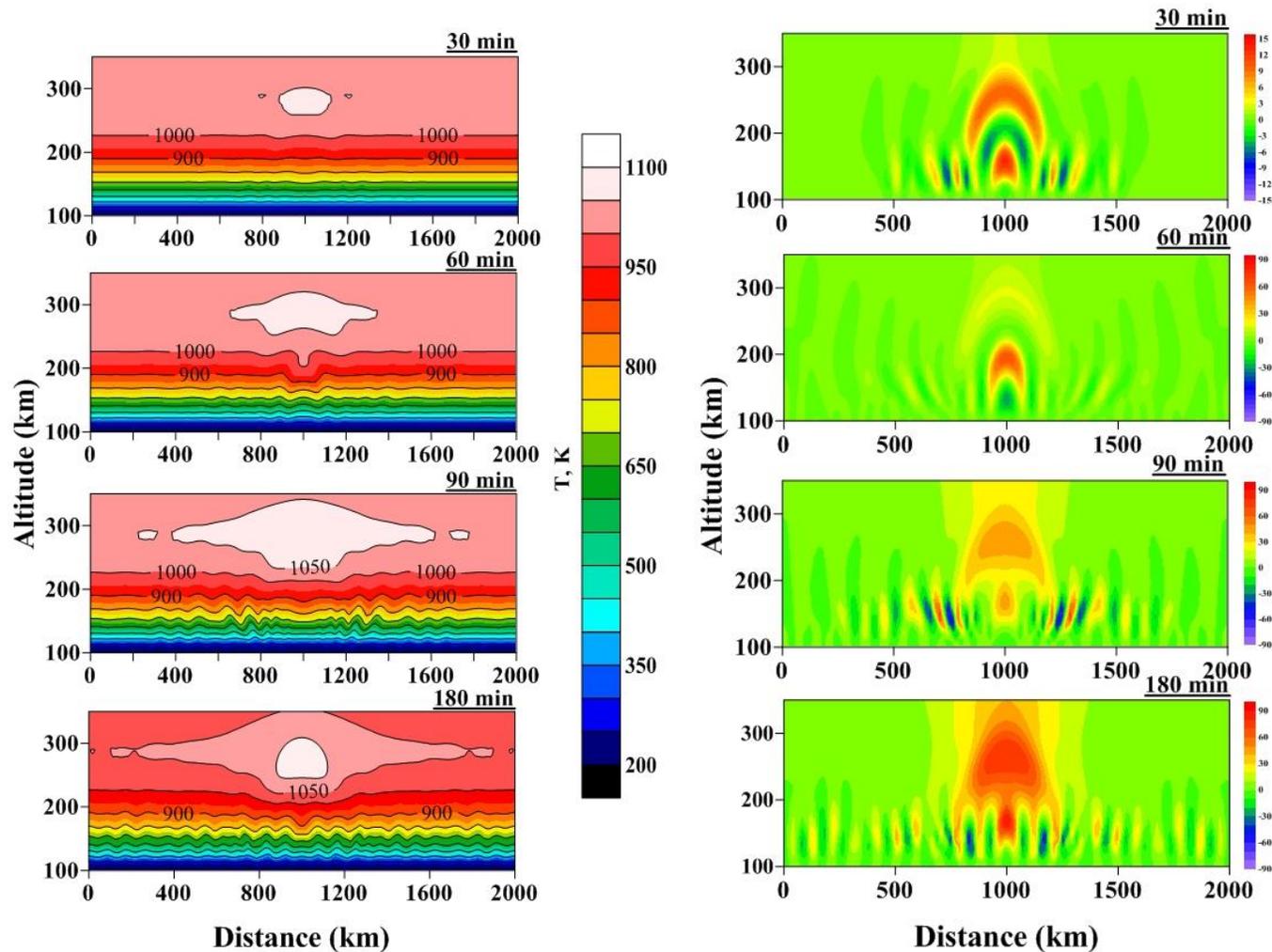
# Модель атмосферных процессов



В моделировании использована трехмерная модель "AtmoSym". Моделирование основано на численном решении полной трехмерной системы нелинейных гидродинамических уравнений для атмосферного газа в виде законов сохранения. Численный метод позволяет рассматривать гладкие решения и аналогичен классической схеме Лакса-Вендроффа.

1. Kshevetskii S.P. Analytical and numerical investigation of nonlinear internal gravity waves. *Nonlinear processes in geophysics*. 2001. N8. 37-51.
2. Kshevetskii S.P. Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2001. v.41. N12. pp. 1777-1791.
3. Kshevetskii S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2001. v.41. N2. pp. 273-288.

# Моделирование «точечного источника»



Цель численного эксперимента состояла в оценке возможности формирования возмущений верхней атмосферы, локализованных в области над источником волн на поверхности Земли, вследствие распространения АГВ из нижней атмосферы. На нижней границе задан источник возмущений, в качестве которого рассматриваются вариации вертикальной компоненты скорости на поверхности Земли в области протяженностью  $\sim 100$  км. Периоды гармоник в рассматриваемом численном эксперименте лежат в интервале от 3 до 10 мин. Через 1-3 часа область малых пространственных масштабов ( $\sim 100$  км) возмущений расширяется в горизонтальном направлении до  $\sim 1000$  км от источника. Максимальные амплитуды волновых возмущений наблюдаются непосредственно над источником на высотах  $\sim 200-250$  км.

Пространственные распределения температура атмосферы  $T(x,z,t)$  и волновых возмущений температуры атмосферы  $(T(x,z,t) - T_0(z))$  для нескольких моментов времени после начала постоянной работы наземного источника.

# Модель ГСМ ТИП

## Термосферные параметры:

$T_n$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ,  $NO$ ,  $N(^4S)$ ,  $N(^2D)$

плотности; векторы скоростей; (от 80 км до 500 км)

## Параметры ионосферы:

$O^+$ ,  $H^+$ ,  $MoI^+$  плотности;

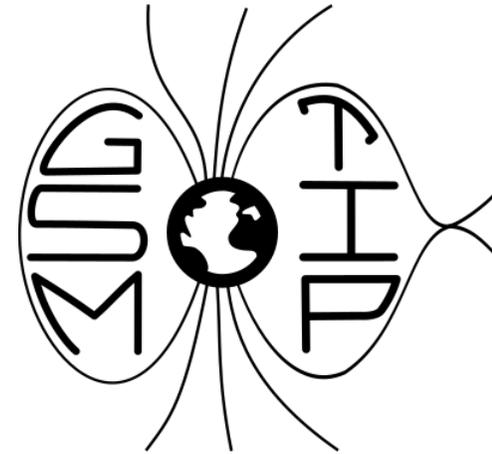
$T_i$  and  $T_e$ ;

Векторы скоростей ионов (от 80 км до 15 радиусов Земли)

## Электрическое поле:

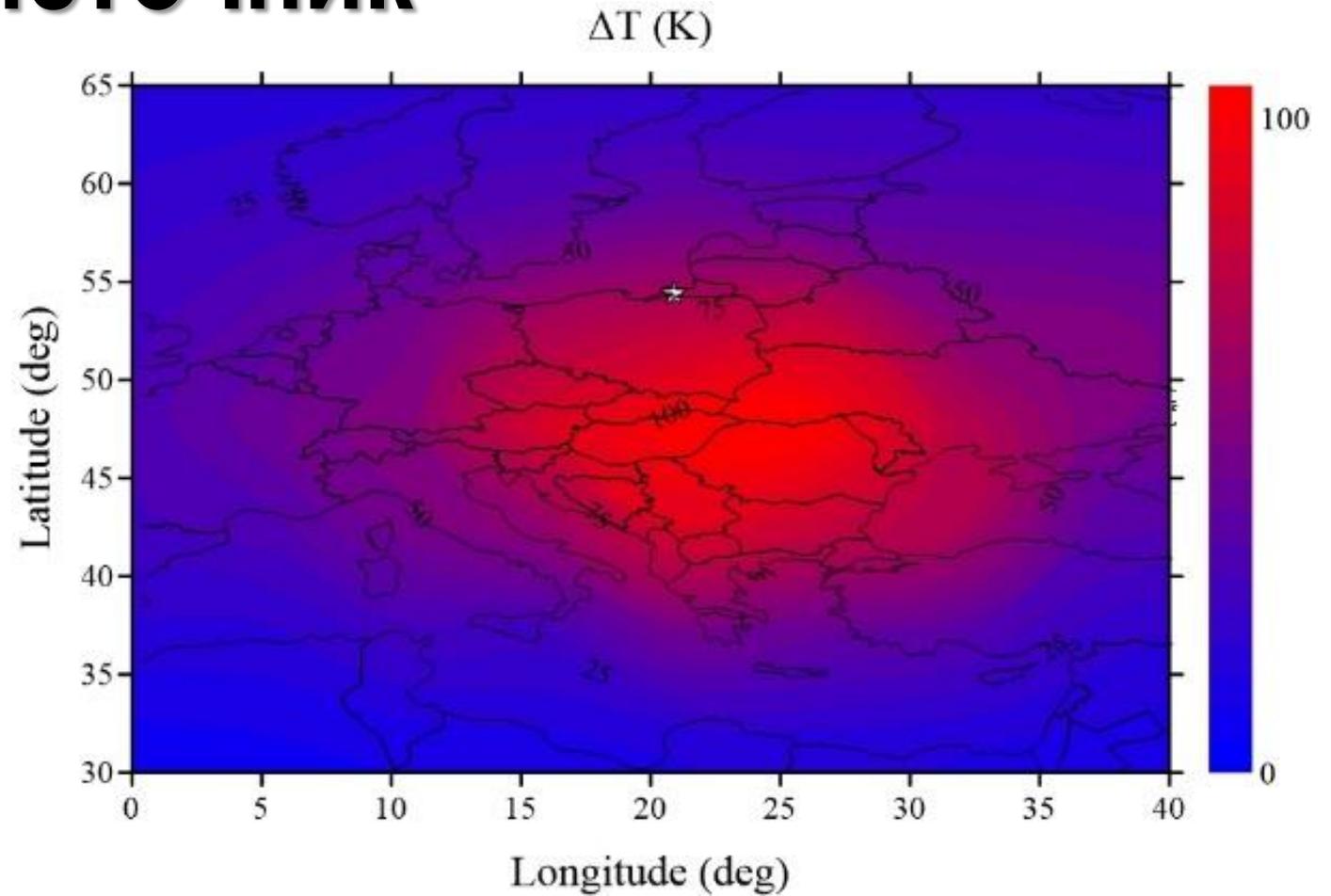
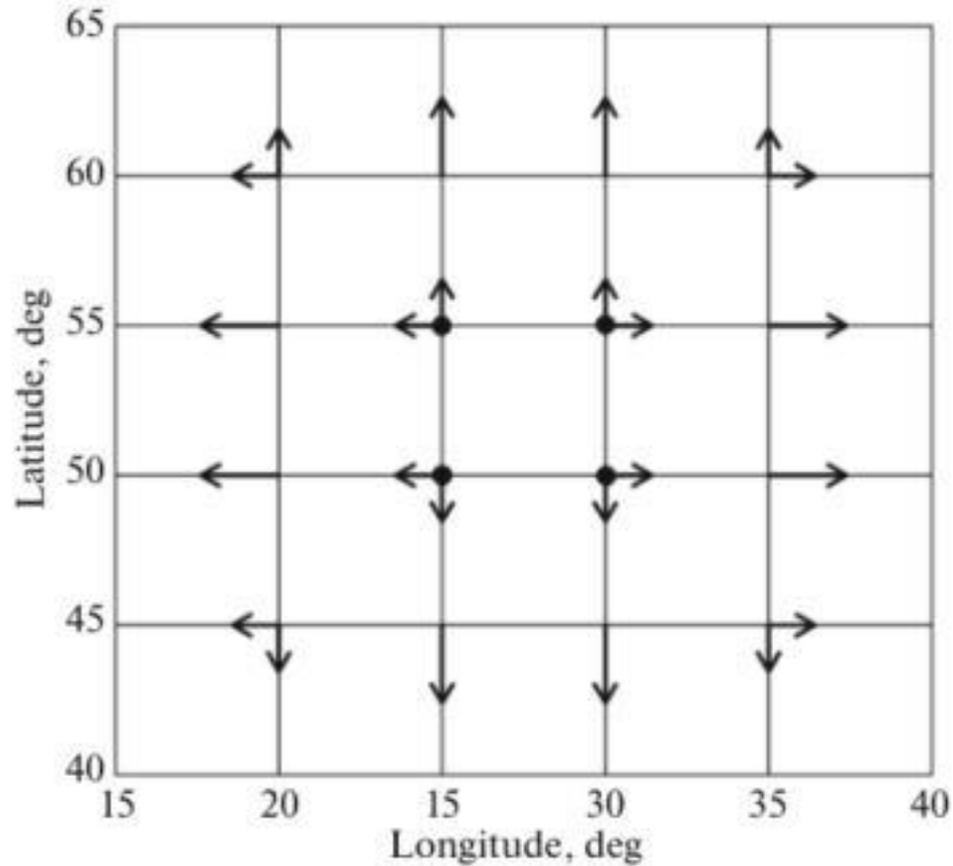
Модель была дополнена новым блоком расчета электрического поля

*Klimenko et al.*, 2006, 2007.



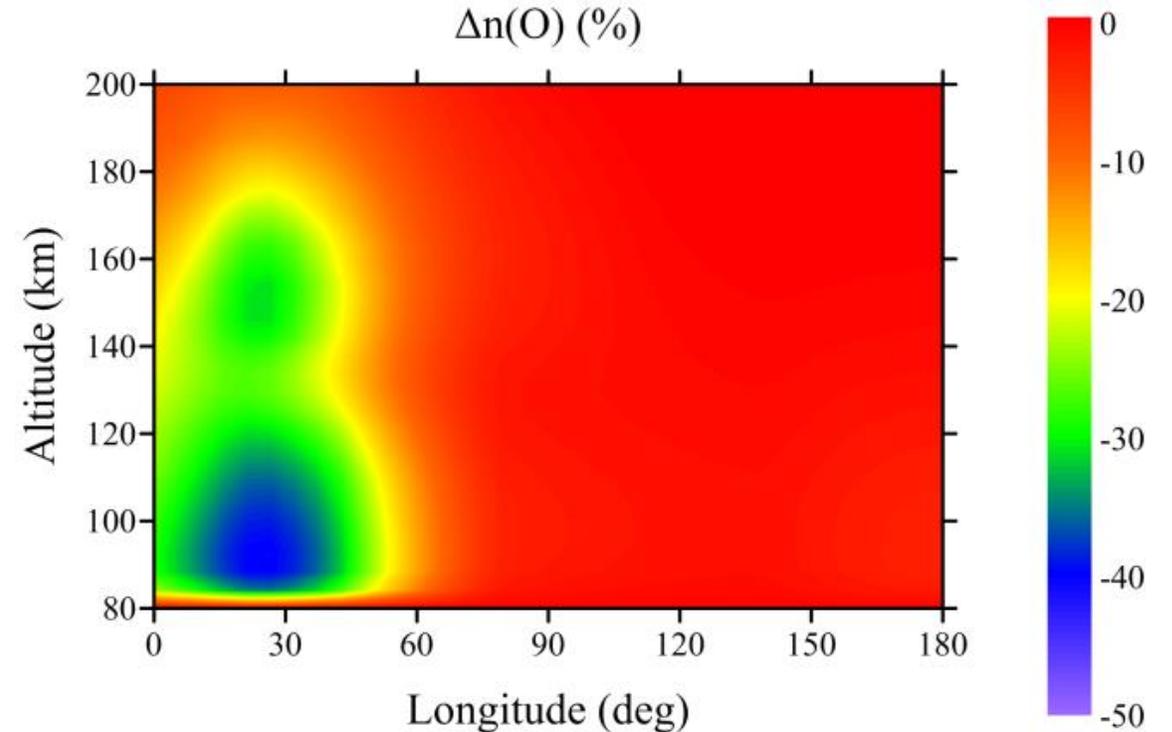
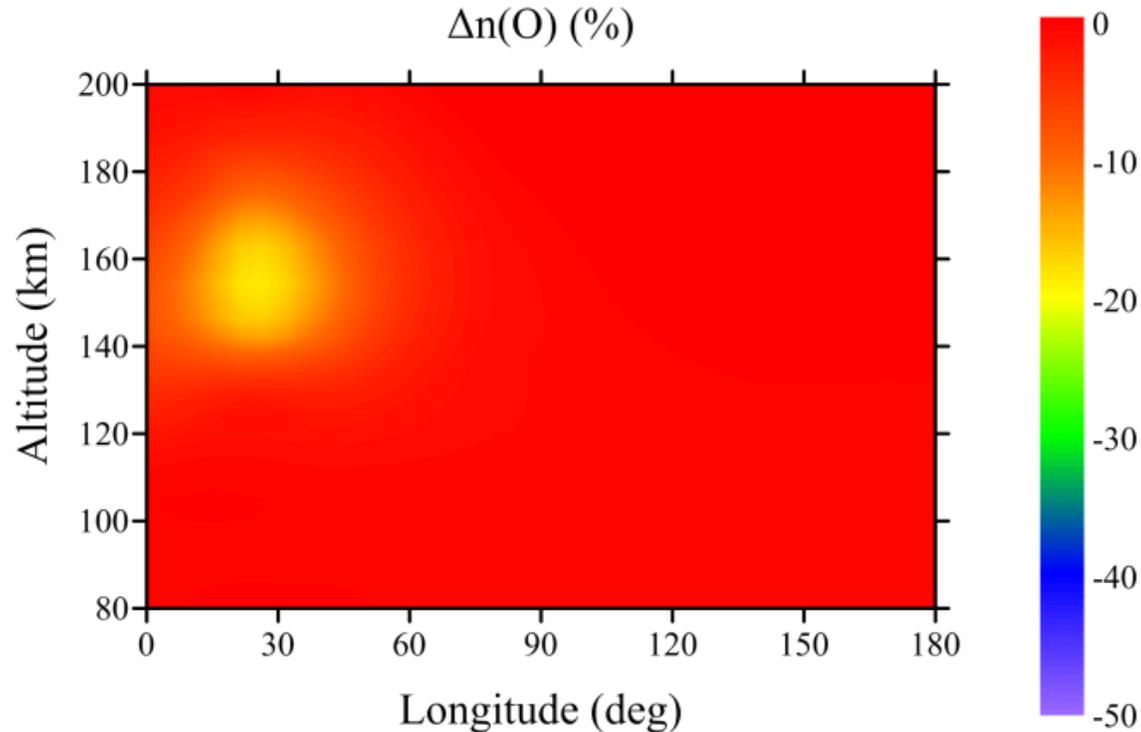
Глобальная Самосогласованная модель термосферы, ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) была разработана в Западном отделе ИЗМИРАНа. Модель ГСМ ТИП была подробно описана в *Namgaladze et al., 1988; Korenkov et al., 1998.*

# Пространственный источник



Пространственный источник был установлен со шкалой 10 на 10 градусов по долготу и широте, соответствующей результату рассеяния акустико-гравитационных волн от шторма над Калининградом. Амплитуда источника выбиралась таким образом, чтобы максимальный нагрев в течение расчетного периода на высоте максимального источника составлял 100к.

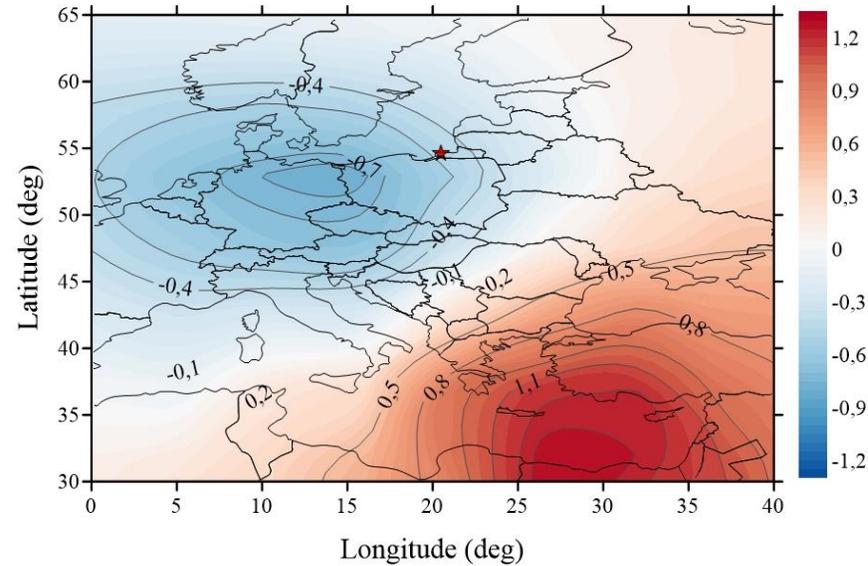
# Тип источника



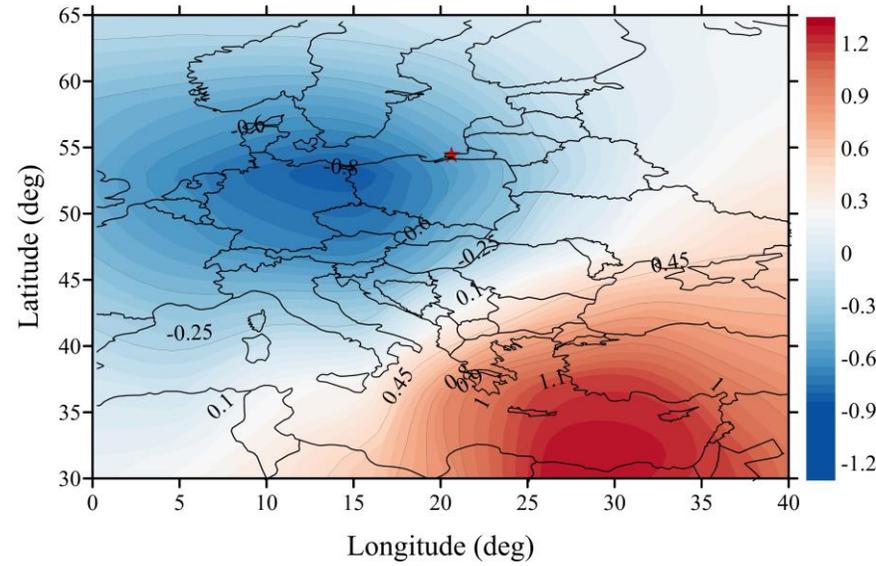
С целью моделирования ионосферных эффектов от прохождения метеорологического шторма был задан комбинированный тип источника, в котором к тепловому источнику добавлялся источник атомарного кислорода, имитирующий изменения в турбулентной диффузии, связанные с прохождением АГВ. Опыт предыдущих расчётов показывал, что такой дополнительный источник может существенно изменить картину ионосферных распределений. Его работу можно проиллюстрировать распределениями относительной (в процентах от фона) добавки к атомарному кислороду в сравнении с невозмущённым состоянием для обоих случаев в 16 UT для метеорологического шторма в октябре 2018 года.

# Результаты моделирования

$\Delta f_oF_2$  (MHz) 10.2017



$\Delta f_oF_2$  (MHz) 10.2018

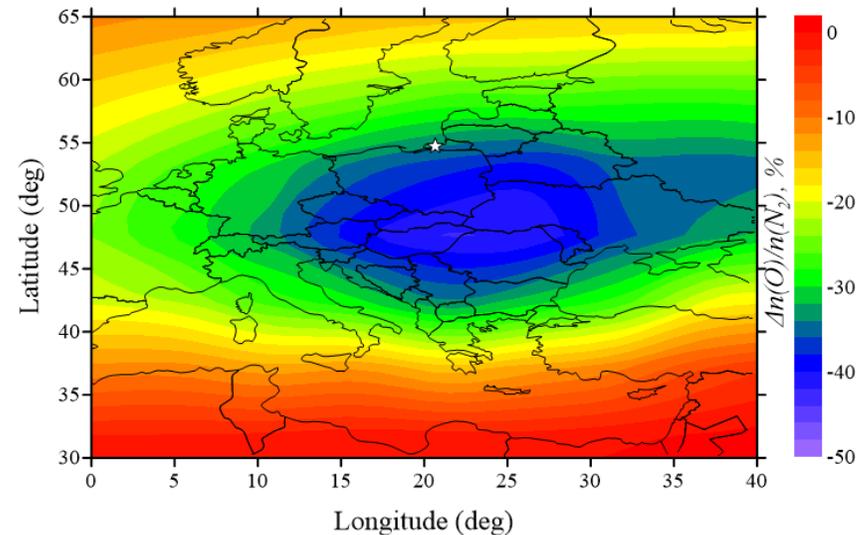
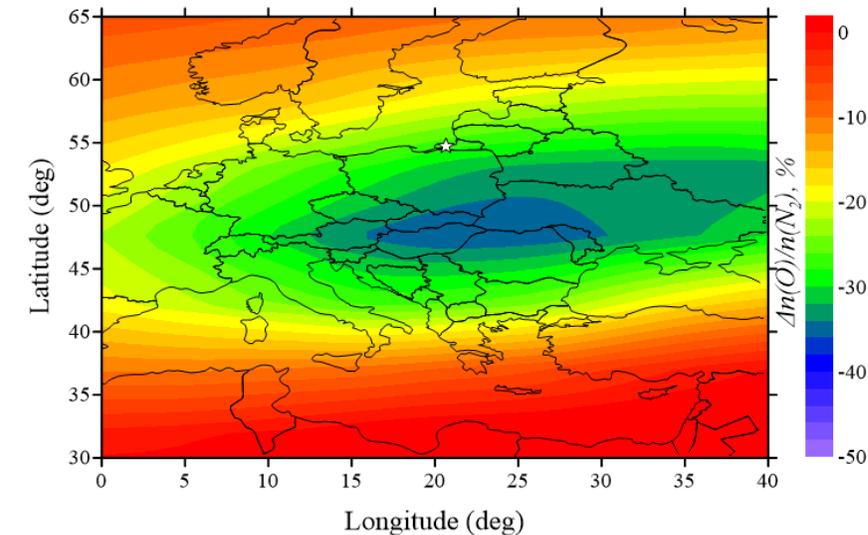


Добавки к foF2 для расчётов с комбинированным источниками для метеорологического шторма в октябре 2017 и 2018 г.

$\Delta n(O)/n(N_2)$   
160 km

24 октября 2018 г.

$\Delta n(O)/n(N_2)$   
200 km



Рассчитаны добавки к отношению концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота возмущенного дня по отношению к невозмущенному. Моделирование указывает на выраженный отрицательный ионосферный эффект от прохождения шторма непосредственно над ним и положительный-к югу и юго-востоку от него.

# Выводы

Моделирование ионосферных эффектов от нагрева термосферы, вызванного диссипацией АГВ, демонстрирует снижение электронной концентрации в максимуме F-слоя дневной ионосферы к северо-западу от области источника и ее повышение к югу и юго-востоку от него.

Результаты численных расчетов с использованием модели ГСМ ТИП с включением дополнительных термосферных источников, моделирующих процессы диссипации акустико-гравитационных волн от источников в нижней атмосфере, показали, что вызванные такими источниками термосферные возмущения приводят к снижению электронной концентрации непосредственно над источником и увеличению к югу и юго-востоку от него.

Отрицательные ионосферные возмущения связаны с изменениями газового состава термосферы: снижением концентрации атомарного кислорода, приводящим к понижению скорости ионизации. Наиболее эффективно на снижение электронной концентрации в ионосфере влияют процессы турбулентной диффузии, приводящие к понижению концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере. Развивающиеся при работе источников возмущений крупномасштабные циркуляционные процессы в термосфере приводят к положительным ионосферным возмущениям, отмечающимся к югу от области источников вплоть до низких широт.

**Проведенное моделирование показывает хорошее согласие с экспериментальными данными, что позволит улучшить моделирование влияния метеорологических возмущений на ионосферу.**