



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.¹, Борчевкина О.П.^{1,2}, Карпов М.И.^{1,2}, Курдяева Ю.А.¹,
Карпов И.В.^{1,2}

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

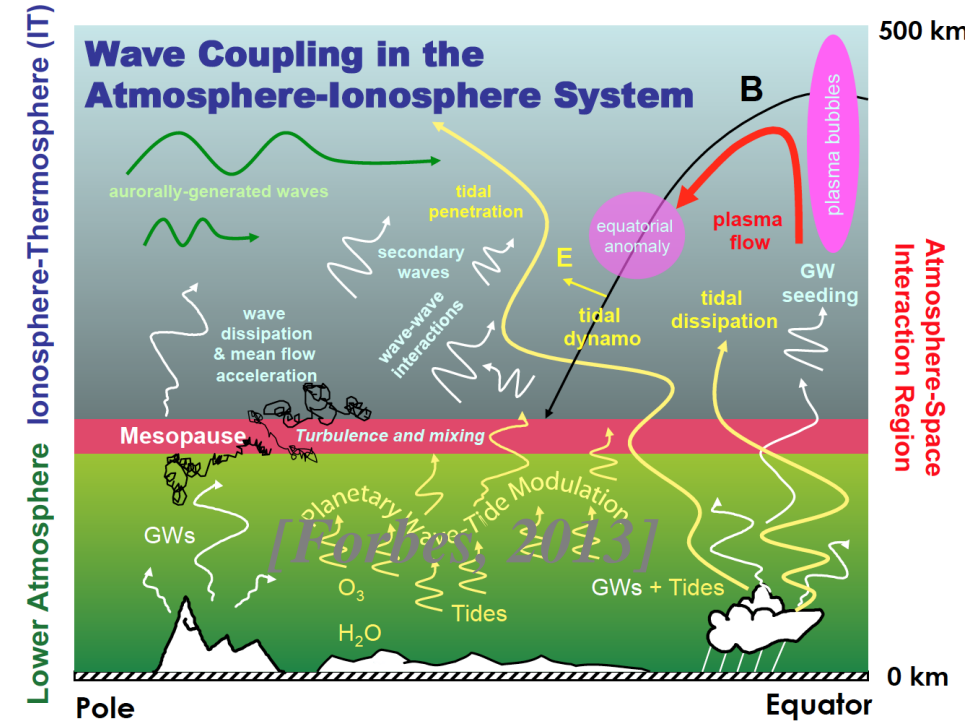
² Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия

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.



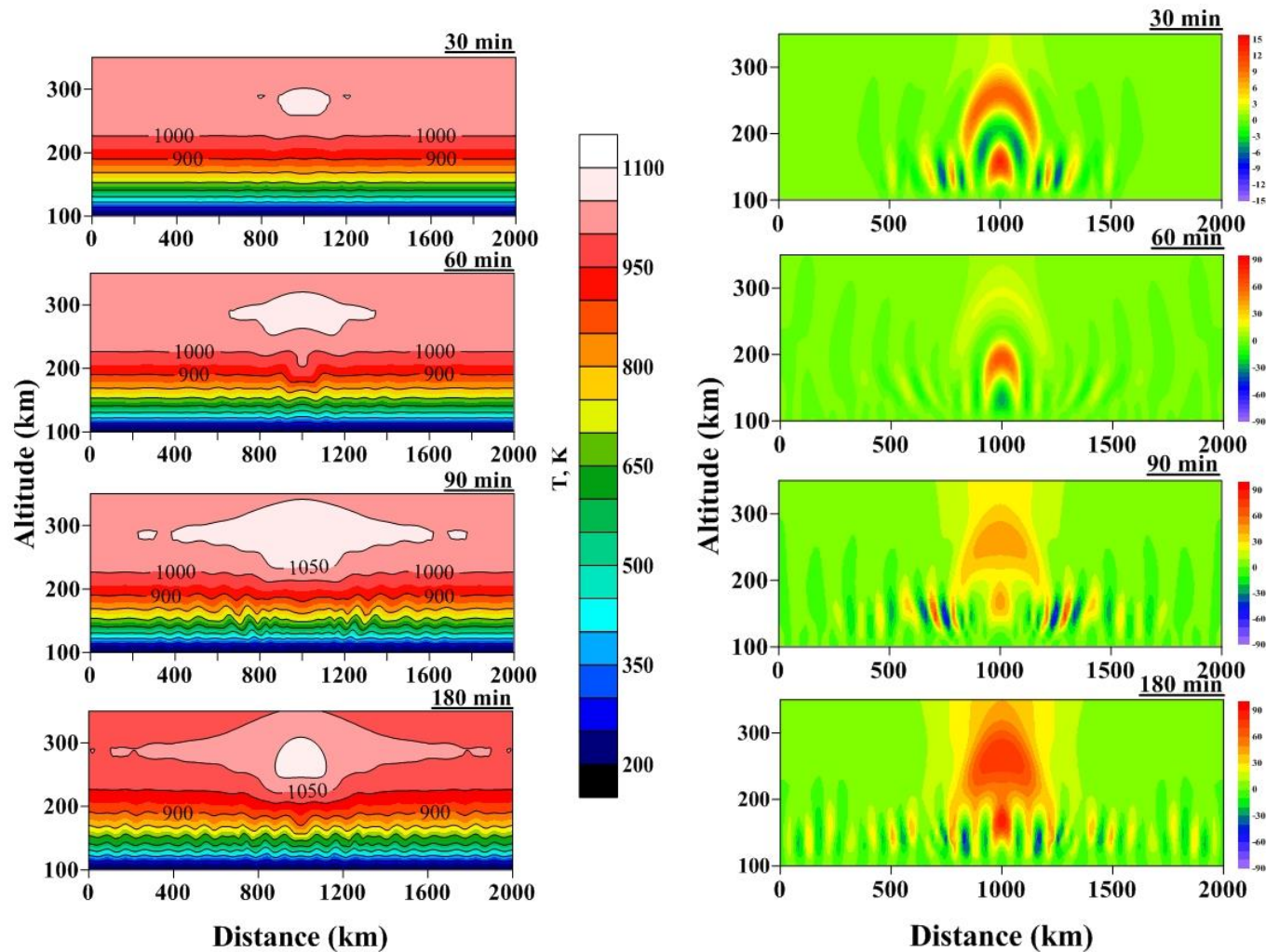
Модель атмосферных процессов



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 ~ 100 км. Периоды гармоник в рассматриваемом численном эксперименте лежат в интервале от 3 до 10 мин. Через 1-3 часа область малых пространственных масштабов (~ 100 км) возмущений расширяется в горизонтальном направлении до ~ 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;

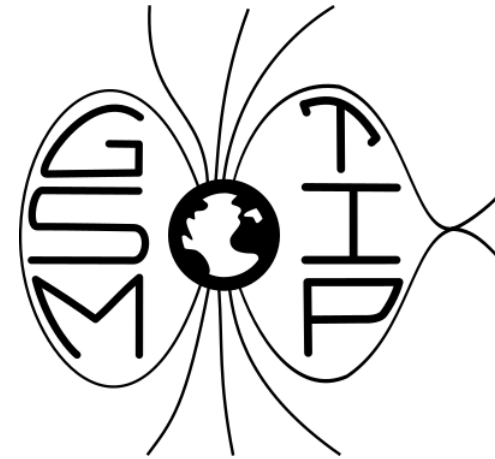
T_i and T_e ;

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

Электрическое поле:

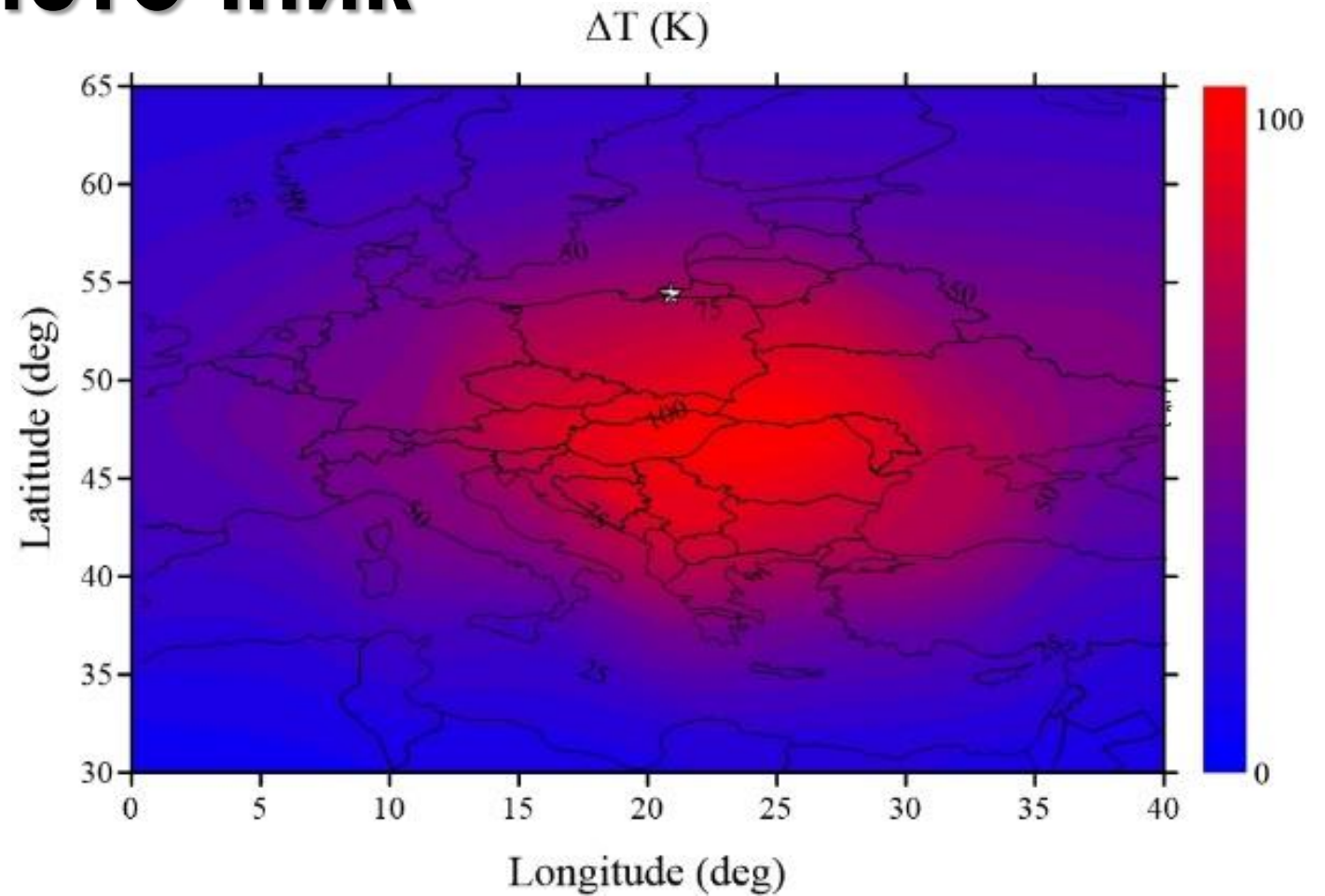
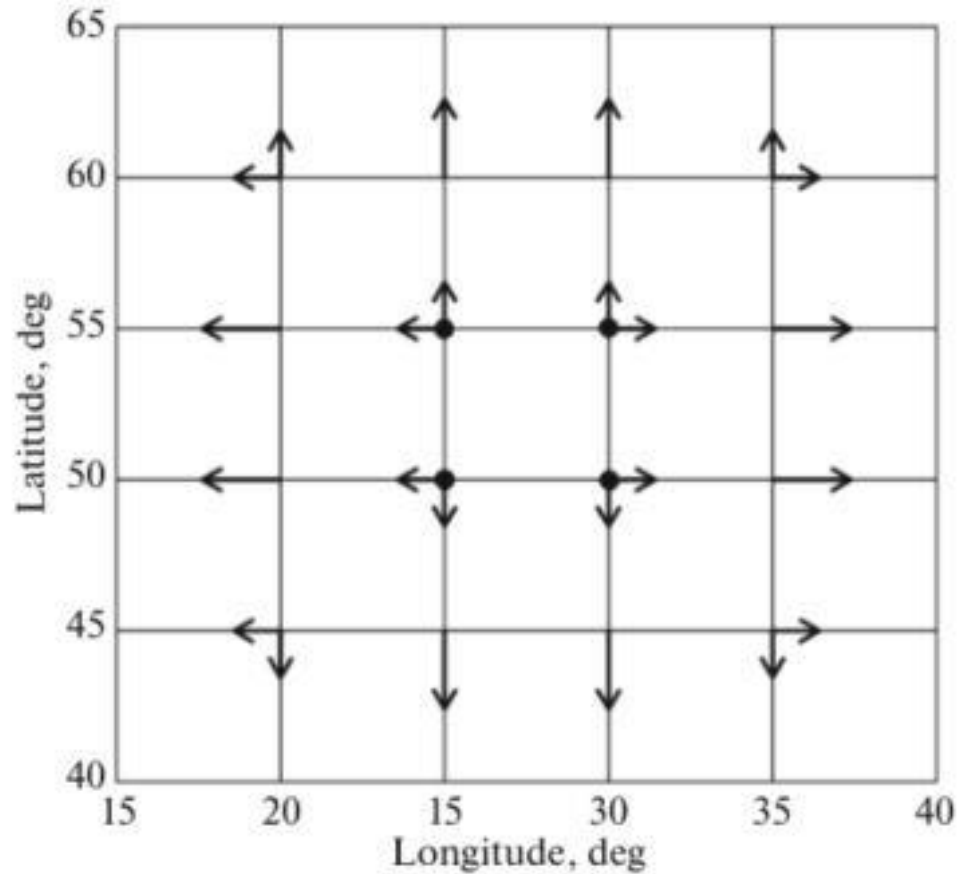
Модель была дополнена новым блоком расчета электрического поля

Klimenko et al., 2006, 2007.



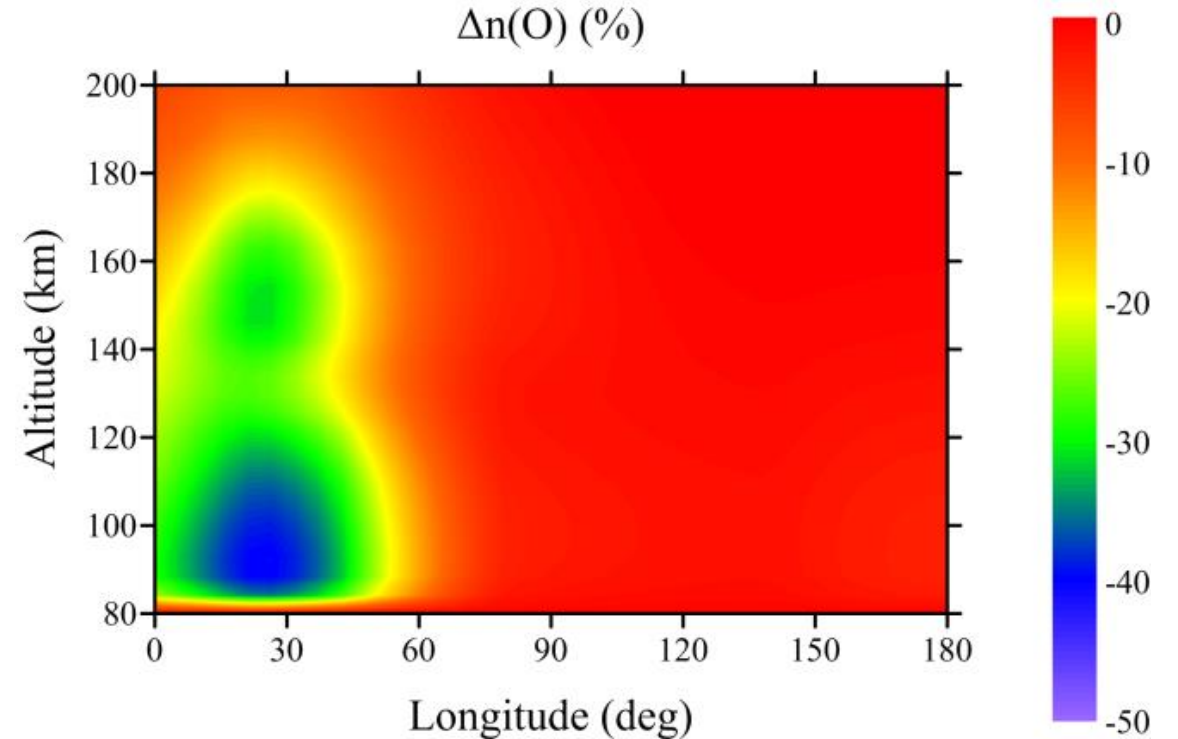
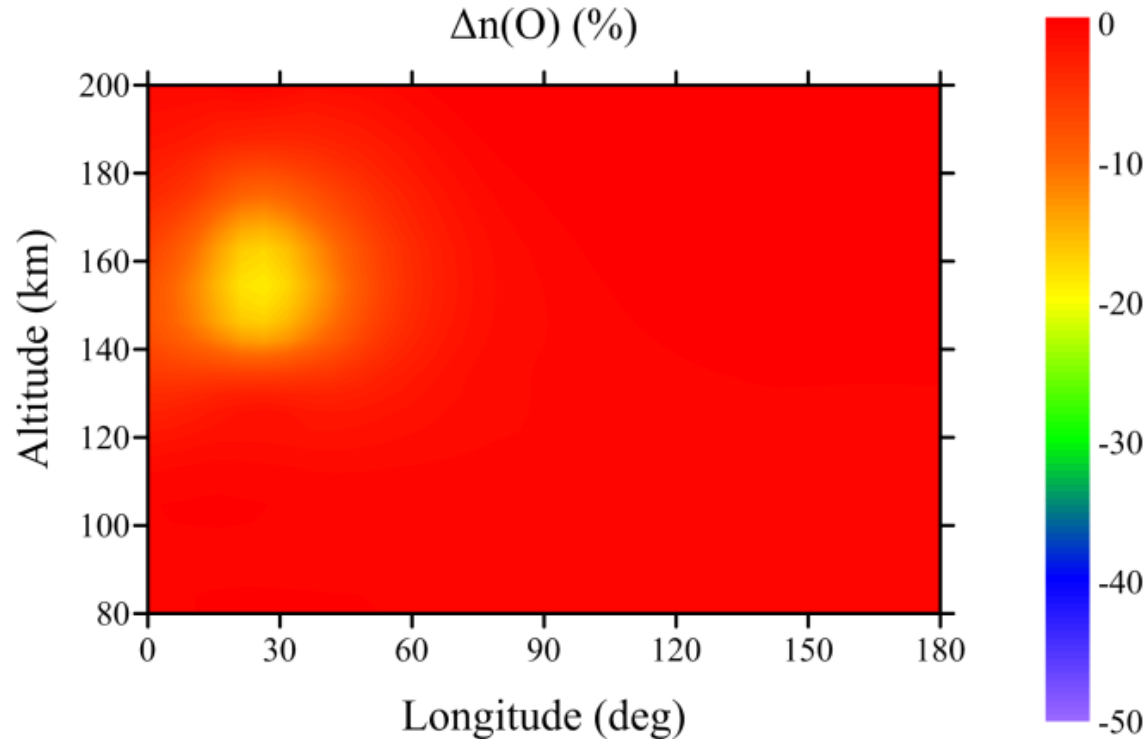
Глобальная Самосогласованная модель термосферы, ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) была разработана в Западном отделе ИЗМИРАНа. Модель ГСМ ТИП была подробно описана в *Namgaladze et al., 1988; Korenkov et al., 1998.*

Пространственный источник



Пространственный источник был установлен со шкалой 10 на 10 градусов по долготе 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.

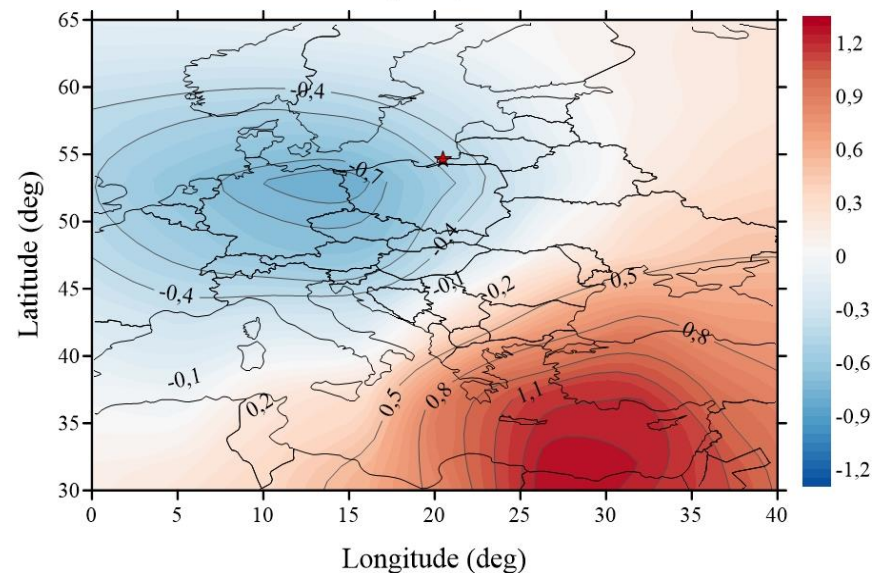
Тип источника



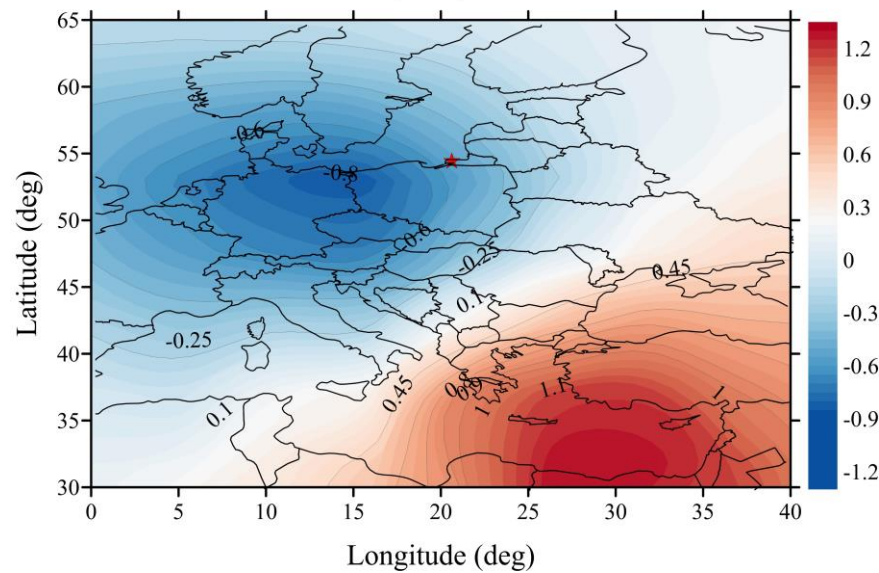
С целью моделирования ионосферных эффектов от прохождения метеорологического шторма был задан комбинированный тип источника, в котором к тепловому источнику добавлялся источник атомарного кислорода, имитирующий изменения в турбулентной диффузии, связанные с прохождением АГВ. Опыт предыдущих расчётов 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

Δf_oF_2 (MHz) 10.2017

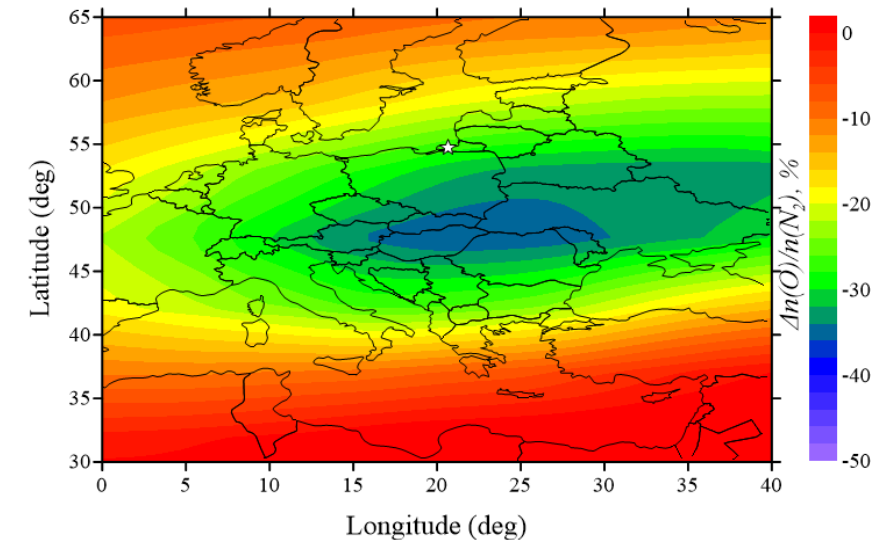


Δf_oF_2 (MHz) 10.2018



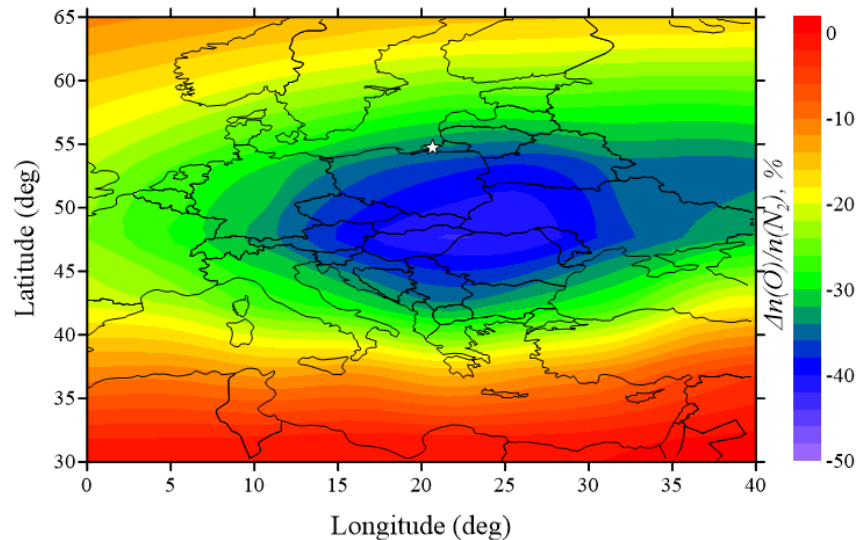
Добавки к f_oF_2 для расчётов с комбинированным источниками для метеорологического шторма в октябре 2017 и 2018 г.

$\Delta n(O)/n(N_2)$
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.