

# Результаты томографической реконструкции вертикального распределения электронной концентрации ионосферы в дальневосточном регионе России по спутниковым данным

А.А. Романов<sup>1</sup>, С.В. Трусов<sup>1</sup>, А.А. Романов<sup>1</sup>, А.В. Новиков<sup>1</sup>, В.Г. Крючков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «РНИИ КП»)

111024, Москва, ул. Авиамоторная, 53

E-mail: [romulas@rniikp.ru](mailto:romulas@rniikp.ru)

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт

141700 Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе представлены результаты томографической реконструкции высотных распределений электронной концентрации в дальневосточном регионе Российской Федерации.

Выполнены исследования по моделированию расположения измерительных установок на территории о. Сахалин, представлены значения ошибок моделирования в зависимости от параметров дискретизации пространства и количества исходных данных для реконструкции.

На приведенных в работе реконструкциях электронной концентрации хорошо выделяются некоторые процессы, ионизирующие ионосферную плазму: распространение акустико-гравитационной волны и пр. Представлены результаты реконструкций, которые были получены с разницей во времени менее 1 часа. Подобный временной интервал позволяет проследить временную эволюцию зарегистрированных возмущений.

## Введение

В последние несколько десятилетий происходит бурное развитие различных методов дистанционного зондирования ионосферы и приложения результатов этих исследований к различным сферам жизнедеятельности человека.

Одним из основных приложений ионосферных исследований является мониторинг возмущений в ионосфере, связанных с землетрясениями, извержениями вулканов, сильными взрывами, атмосферными грозами и пр. [1]. В соответствии с [2, 3] в ионосфере можно зарегистрировать акустико-гравитационные волны (АГВ), источником которых являются вышеперечисленные природные явления. К тому же, существует мнение, что АГВ могут генерироваться даже перед серьезными землетрясениями, как предвестник данной катастрофы [4].

В 2007 году при головной роли ФГУП «РНИИ КП» был проведен первый этап пилотного проекта по диагностированию ионосферных предвестников землетрясений по данным навигационных космических систем в дальневосточном регионе России. В рамках проекта был проведен комплексный эксперимент по сбору данных дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности о. Сахалин, в число которых вошла информация о состоянии ионосферной плазмы.

В данной работе представлены результаты исследования ионосферы в дальневосточном регионе России. Первая реконструкция электронной концентрации для этого региона исследований приведена в работе [5]. До недавнего времени исследования ионосферы российскими учеными проводились исключительно в авроральных зонах [6], проводились также совместные эксперименты по исследованиям экваториальной аномалии [6].

## Метод исследования

Задача томографической реконструкции относится к классу обратных задач. Суть ее состоит в том, чтобы по набору измеренных интегральных характеристик среды (полному электронному

содержанию вдоль луча распространения сигнала в ионосфере) восстановить функцию пространственных переменных  $(N_e)^{ij}$  в некоторых узлах сетки (внутреннюю структуру распределения электронов в ионосфере). Интегральной характеристикой при радиопросвечивании ионосферы является полная фаза радиосигнала, пропорциональная полному электронному содержанию ионосферы вдоль распространения луча зондирования, однако физически измеряется только фаза в пределах  $2\pi$ , а количество полных циклов неизвестно. Отсюда возникает проблема выделения начальной фазы сигналов, излучаемых спутником. Для решения данной проблемы авторами [7] был предложен метод фазоразностной томографии, использующий производную фазы (которая очевидно не содержит неизвестную постоянную константу, соответствующую начальной фазе сигнала), при этом отпадает необходимость в определении неизвестной постоянной.

Набор измерений интегральной характеристики позволяет сформировать систему алгебраических уравнений, для решения которой могут быть использованы различные методы. В данной работе при численном моделировании результатов эксперимента и реконструкции реальных данных использовался алгоритм ART с релаксацией [8].

### Численное моделирование

Поскольку метод томографической реконструкции применялся для восстановления высотного разреза электронной концентрации ионосферы в дальневосточном регионе России впервые, было необходимо осуществить модельные исследования для определения оптимального географического размещения томографических установок.

Пространственная ориентация о. Сахалин, на территории которого проводится эксперимент, является очень удачным для осуществления томографических экспериментов. Остров расположен практически в меридиональном направлении. Следовательно, спутники типа КОСМОС-2407 с наклоном в  $82^\circ$  практически идеально подходят в качестве источника когерентного радиосигнала на частотах 150/400 МГц.

В качестве опорной точки для расположения первой станции был выбран город Южно-Сахалинск. Основной задачей численного эксперимента было определение оптимального расположения приемных томографических установок сигналов низкоорбитальных навигационных аппаратов для территории о. Сахалин, отталкиваясь от юга острова.

Результаты численного моделирования (рис. 1) в котором в качестве неизвестных параметров фигурировали расстояния между станциями и разрешение сетки разреза показали, что наименьшие ошибки реконструкции высотного разреза электронной концентрации для данного региона могут быть достигнуты при расстоянии между станциями порядка 250 км, разрешении сетки разреза ориентировочно 40 км x 20 км.

Для моделирования прямой задачи было выбрано типичное высотное распределение электронной концентрации в ионосфере, которое было дополнено «возмущениями», горизонтальным размером порядка 150 км и концентрацией максимума  $1,4E+11$  эл/м<sup>3</sup>,  $1,5E+11$  эл/м<sup>3</sup> и  $1,3E+11$  эл/м<sup>3</sup> соответственно.

На рис. 1а представлено «идеальное» высотное распределение электронной концентрации, которое необходимо восстановить в результате численного эксперимента с минимальными невязками. На рис. 1б представлен результат реконструкции модельного распределения. Ошибки реконструкции составили ошибки  $\delta_1=0.03$ ,  $\delta_2=0.01$  [2, 6]. На рис. 2а представлены графики исходных и восстановленных доплеровских данных (скорости изменения разности фаз, а, следовательно, полного электронного содержания) для данной модельной задачи.

На рисунках 1в и 1г представлен результат реконструкции высотного модельного профиля электронной концентрации ионосферы, но правая часть системы была зашумлена 10% и 30% шумом. Ошибки реконструкции для данных моделей составили ошибки  $\delta_1=0.04$ ,  $\delta_2=0.02$  и  $\delta_1=0.09$ ,  $\delta_2=0.04$ . На рис. 2б и 2в представлены временные распределения доплеровской частоты, соответствующие моделируемым системам.

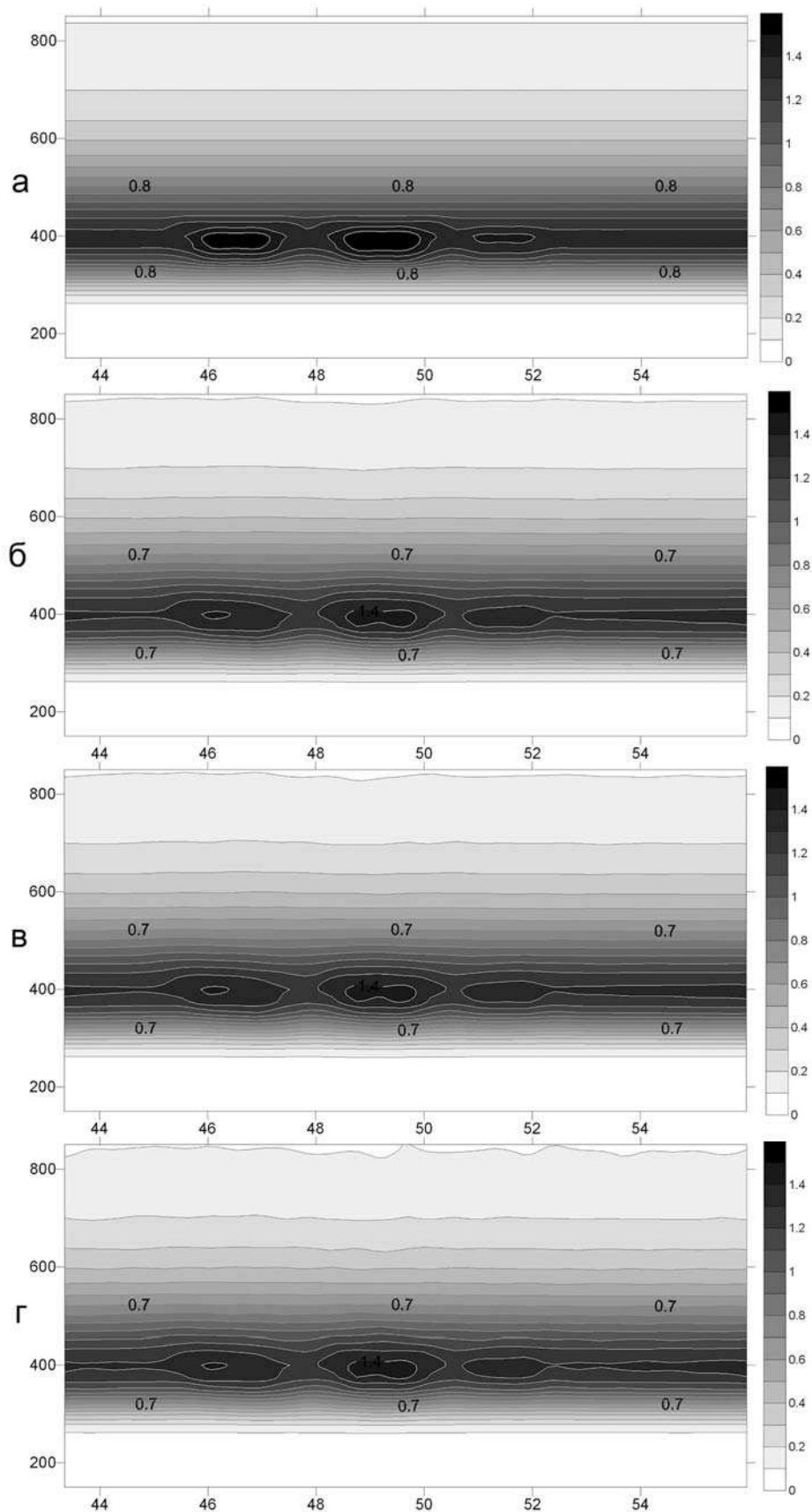


Рис. 1. Результаты численного моделирования восстановления распределения электронной концентрации в координатах высота (км) – географическая широта (град), цветовая шкала в  $\text{эл}/\text{м}^3$ : а – исходное распределение, б – реконструкция распределения по неизменной правой части, в – 10%-ное зашумление правой части, г – 30% зашумление правой части

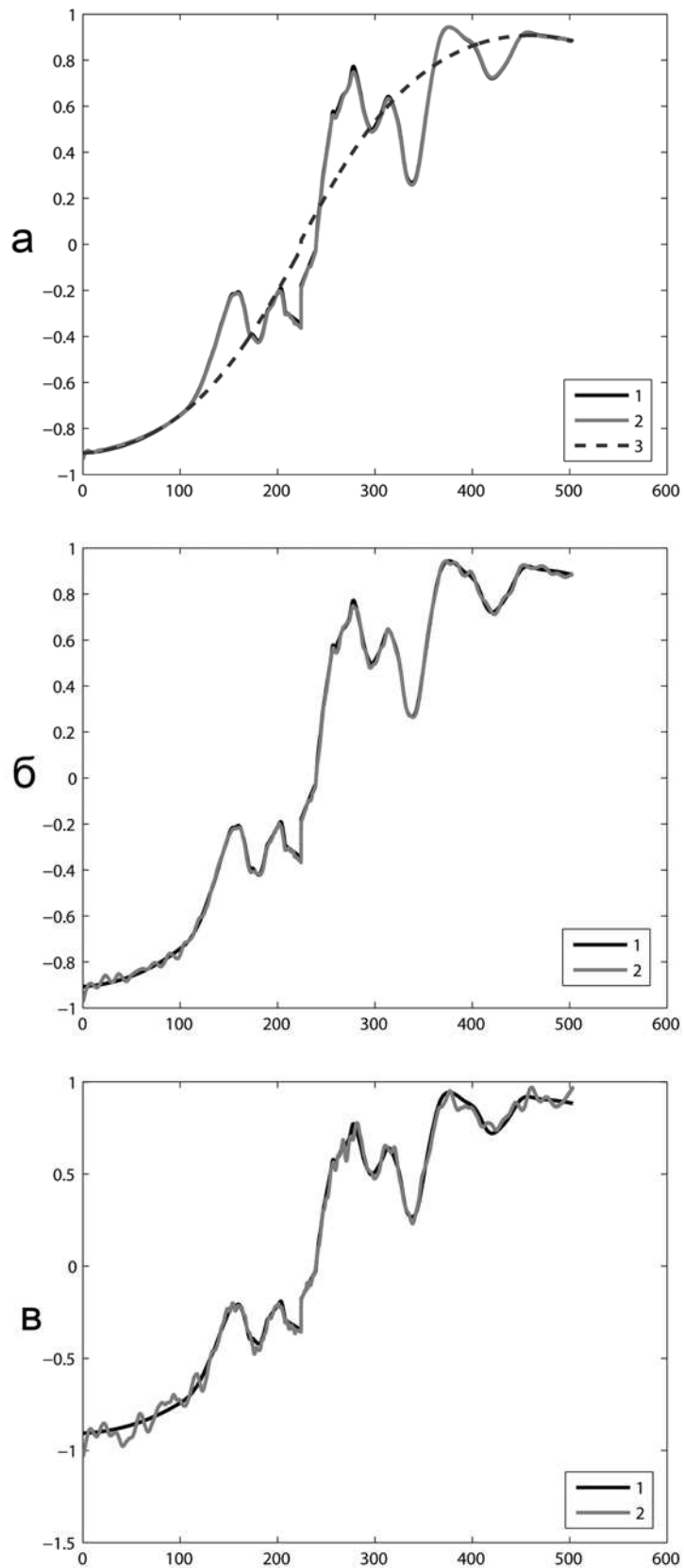


Рис. 2. Доплеровская частота для приемника на широте 47 град. в координатах время (с)-частота(рад/с):  
 а) модельные данные (1 – модельные «экспериментальные» данные, 2 – восстановленные значения, 3 – начальное приближение); б) реконструкция данных с 10%-ным зашумлением; в) реконструкция данных с 30%-ным зашумлением

Основываясь на данных проведенного моделирования, томографические установки были установлены в населенных пунктах (с севера на юг) Ноглики, Поронайск и Южно-Сахалинск о. Сахалин, а расстояние между станциями составляет 260 и 270 км, что является отклонением на 4% и 8% от рекомендованного.

### Результаты эксперимента

На рис. 3 представлены аномалии электронной концентрации, реконструированные методом фазоразностной томографии во время ночных пролетов спутников (Рис. 3 а, б, и в соответственно 23, 27 и 30 июля). Реконструкцию 23 июля можно интерпретировать как распространяющееся волновое возмущение с длиной волны порядка 200 км. Это может быть акустико-гравитационная волна, возбужденная аномалией электрического поля в соответствии с механизмом [4]. Реконструкцию 30 июля можно интерпретировать как кольцевую структуру с минимумом над г. Южно-Сахалинск.

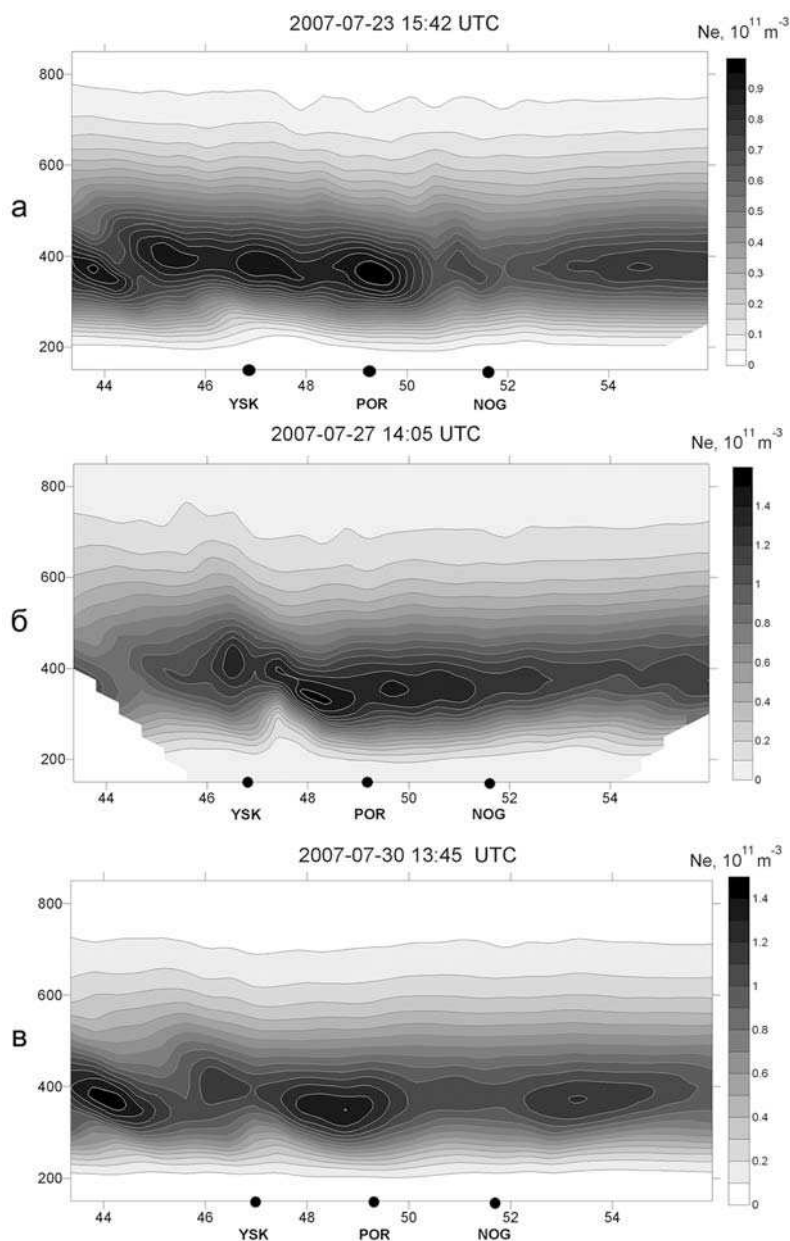


Рис. 3. Вертикальное распределение электронной концентрации в ионосфере в районе о. Сахалин в координатах высота (км) – географическая широта (град). Локальное время = UTC+10. Латинскими буквами отмечено расположение приемных установок: YSK – Южно-Сахалинск, POR – Поронайск, NOG – Ноглики

На рис. 4 представлены реконструкции состояния ионосферы, которые были получены с разницей во времени менее 1 часа. Подобный временной интервал позволяет проследить временную эволюцию зарегистрированных возмущений.

На рис. 4а представлена реконструкция электронной концентрации ионосферы, полученная 2007-08-14 в 12:06 UTC (местное время = UTC+10). Отчетливо выражена группа ионосферных неоднородностей в максимуме слоя  $F_2$  ионосферы. На реконструкции можно выделить структуру на расстоянии 180 км к югу от г. Южно-Сахалинск размером 50x50 км, структуру аналогичного размера непосредственно над г. Южно-Сахалинск, а также две структуры на расстоянии 300 и 500 км, с горизонтальным размером порядка 100 км. Электронная концентрация в этих неоднородностях составила порядка  $1.4-1.5E+11$  эл/м<sup>3</sup>.

На рис. 4б представлен разрез электронной концентрации, полученный 2007-08-14 в 13:04 UTC, позволяющий проследить временную эволюцию состояния ионосферы. На данном вертикальном разрезе выявляются, аналогично предыдущей реконструкции (рис. 4а), четыре структуры, но их пространственные координаты и значения максимумов несколько изменились. Выявленные структуры сместились по направлению на север примерно на 100 км, а концентрация их максимумов достигла величины  $2E+11$  эл/м<sup>3</sup>.

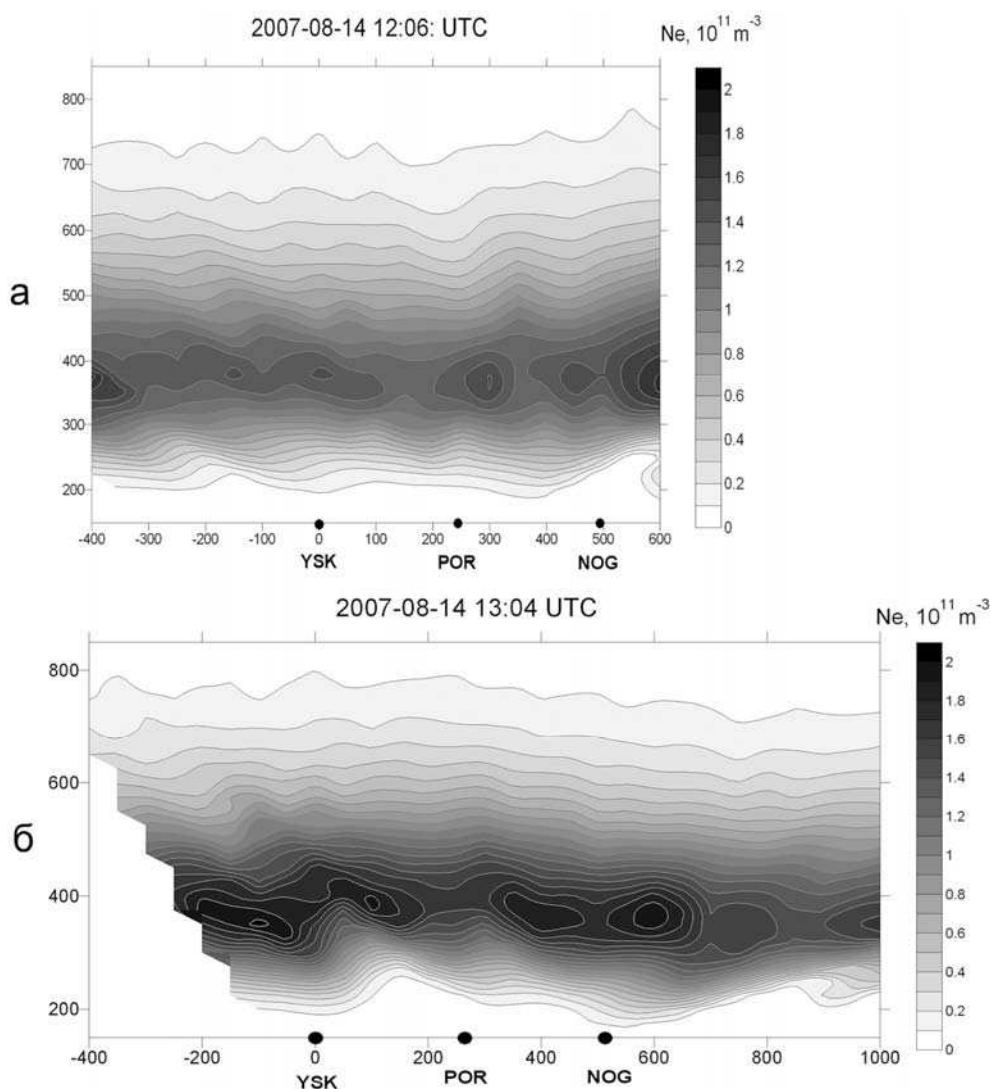


Рис. 4. Временная эволюция вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере в районе о. Сахалин в координатах высота (км) – расстояние от Южно-Сахалинска (км), усл. обозначения см. рис. 3

Возмущения, представленные на рис. 4, можно интерпретировать как горизонтальное волновое возмущение с длиной волны порядка 200 км, аналогично представленному на рис 3а. При этом процесс, вызвавший данное возмущение (например, распространение акустико-гравитационной волны усиливается со временем, сильнее ионизируя ионосферную плазму.

### Заключение

В рамках данного исследования представлены результаты численного моделирования задачи реконструкции электронной концентрации методом фазоразностной томографии в Дальневосточном регионе Российской Федерации. Получены численные значения ошибок данного метода в зависимости от реального расположения измерительных станций, параметров дискретизации исследуемого пространства, а также определено оптимальное количество необходимой исходной информации о состоянии ионосферы для данной конфигурации измерительной системы.

Исследована устойчивость выбранного метода реконструкции в условиях 10% и 30% зашумления данных прямой задачи. Показано, что ошибки реконструкции возрастают незначительно и в случае 30% зашумления не превышают 10%.

Представлены реконструкции высотного распределения электронной концентрации, полученные по реальным измерениям, проведенным в Дальневосточном регионе Российской Федерации.

Анализ полученных результатов показывает, что на высотных реконструкциях хорошо выделяются сигнатуры различных процессов происходящих в ионосфере, например, распространение акустико-гравитационных волн и пр.

Представлены результаты реконструкций, сделанных между 12 и 13 часами 2007-08-14 (UTC), что позволило проанализировать некоторые вопросы динамики ионосферной плазмы. Показано, что неоднородности, выделяющиеся на обеих реконструкциях, на более поздней реконструкции смещены к северу на расстояние порядка 100 км, а значения максимальной электронной концентрации в них увеличилась на 25-30%.

### Литература

1. Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. ВУЗов Радиофизика. 1999. Т. XLII. № 1. С.3-25.
2. Kunitsyn V., Tereshchenko E. Ionospheric Tomography // Springer-Verlag, 2003. 272p.
3. Андреева Е.С., Гохберг М.Б., Куницын В.Е. и др. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов // Космические исследования, 2001. Т. 39. № 1. С.13-17.
4. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия, 1996. №36. С.111-118.
5. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса, 2008. №2. С.1-7.
6. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы // М.:ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
7. Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 1992. Т. 32. №1. С.104-110.
8. Цензор Я. Методы реконструкции изображений, основанные на разложении в конечные ряды //ТИИЭР, 1983. Т.71. №3. С.148-159.