

О возможности детектирования локальных особенностей зоны главного ионосферного провала по данным навигационных спутниковых систем

В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru*

Настоящая работа посвящена демонстрации возможности применения метода радиопросвечивания ионосферы Земли сигналами навигационных спутниковых систем для исследования особенностей состояния субавроральной ионосферы в главном ионосферном провале, которые проявились в аномальном положении плазмопаузы и снижении электронной концентрации. Аномалия была обнаружена при обработке экспериментального материала, полученного в ходе непрерывного мониторинга состояния ионосферы, осуществляемого с помощью аппаратно-программного комплекса, работающего по данным среднеорбитальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС. Полученный эффект в виде резкого уменьшения электронной концентрации в F2-слое ионосферы наблюдался на широтах 57–59° и в двух долготных секторах, примерно 25–35° и 40–50° в.д. Обнаруженная зона локального снижения электронной концентрации наблюдалась внутри главного ионосферного провала по данным всех спутников, траектории подыоносферных точек для которых находились на широтах 57–59° в утренние, вечерние и ночные часы. Ширина зоны в утреннее время суток составила около 0,9°, в вечернее — около 0,5°. При этом наблюдалось уменьшение электронной концентрации более чем в 6 раз в утреннее время и в 4 раза — в вечернее. Ширина главного ионосферного провала составила в данном случае около 8°.

Ключевые слова: ионосфера, электронная концентрация, навигационные системы, авроральная зона, главный ионосферный провал, аппаратно-программный комплекс, радиопросвечивание

Одобрена к печати: 26.01.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-229-240

Введение

Ионосфера в областях авроральной зоны и главного ионосферного провала (ГИП) мало поддается модельному описанию и тем более долгосрочному прогнозу, для которого необходимо непрерывное получение оперативной информации. Использование космических аппаратов для мониторинга ионосферы в таких областях представляется реалистичным и эффективным.

В последнее время большое распространение получило радиозондирование ионосферы с использованием сигналов спутников навигационных систем GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система). Практическая реализация ионосферного зондирования является достаточно сложной задачей и основана на решении обратных задач математической физики. Глобальные спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС дают уникальную возможность получения высотного профиля распределения электронной концентрации ионосферы Земли в подорбитальном пространстве космического аппарата для различных гелио- и геофизических условий в любое время суток и любой точке земной поверхности.

Впервые реконструкции ГИП были получены в марте–апреле 1990 г. сотрудниками Московского государственного университета и Полярного геофизического института РАН (Андреева и др., 1990). В дальнейшем определение провалов электронной плотности радиотомографическими методами с использованием данных навигационных спутниковых систем получило широкое распространение (см., например, работы (Ciraolo, Spalla, 1998; He et al., 2011; Kersley et al., 1997; Krankowski et al., 2009; Kunitsyn et al., 1995; Liu, Xiong, 2020; Mitchell, Spencer, 2003; Natali et al., 2020; Parker et al., 2018; Pryse et al., 1993, 2006)). Статистический анализ параметров главного ионосферного провала над северным полушарием, полученный

на основе данных GPS о полном электронном содержании в период с 2000 по 2014 г., представлен в публикации (Yang et al., 2015). В исследовании (Perevalova et al., 2020) для обнаружения достаточно крупных ионосферных структур, таких как высокоширотные ионосферные провалы, использован метод, основанный на анализе аномальных отклонений полного электронного содержания вдоль трассы распространения радиосигнала по линии «навигационный приёмник – спутник». Динамика расположения минимумов в распределении электронной концентрации в высокоширотной ионосфере на фиксированной восточной долготе 20° проанализирована в работе (Shagimuratov et al., 2018) для зимы (декабрь 2015 г.), равноденствия (март 2015 г.) и лета (июнь 2015 г.), а также в штормовые дни 20 декабря, 17 марта и 22 июня 2015 г. Для анализа использовались карты распределения полного электронного содержания, построенные по данным системы GPS с более чем 180 европейских станций, что позволило получить широтные профили электронной концентрации на географической сетке $1 \times 1^\circ$. Показано, что зимой и во время штормового равноденствия главный ионосферный провал на указанной долготе регистрировался в основном на широтах $47\text{--}52^\circ$. В ночные и утренние часы (00:00–06:00 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время)) минимум главного ионосферного провала наблюдался на широте около 55° .

Результаты наблюдения главного ионосферного провала над Европой при разных уровнях геомагнитной возмущённости по данным радиотомографии с использованием низкоорбитальных и высокоорбитальных спутниковых систем представлены в работах (Туманова и др., 2016; Ciraolo, Spalla, 1998). Анализ результатов наблюдения показал, что форма провала, его глубина и ширина варьируются в зависимости от уровня геомагнитной активности. Однако главный ионосферный провал является значительно более сложным образованием, чем простое снижение электронной плотности в определённом интервале широт (Aa et al., 2020; Ahmed et al., 1979; Wildman et al., 1976). Поэтому особый интерес представляет структура распределения электронной концентрации внутри самого провала. Однако пространственно-временное разрешение метода радиотомографии в силу неравномерного размещения наземных приёмников навигационных сигналов не позволяет реконструировать мгновенные изменения в распределении электронной концентрации, наблюдаемые вдоль траектории подыоносферных точек.

Методы радиотомографии с применением низкоорбитальных спутниковых систем позволяют реконструировать распределение электронной концентрации в ионосфере над цепочкой приёмников в вертикальной плоскости с временным разрешением 5–10 мин. Их пространственное разрешение составляет 20–30 км по горизонтали и 30–40 км по вертикали. Вертикальное и горизонтальное разрешение этих методов с применением высокоорбитальных навигационных систем, как правило, не лучше 100 км с шагом по времени 20–60 мин (Туманова и др., 2016). Существующие в настоящее время методы моделирования, основанные на использовании данных спутниковых навигационных систем, могут быть применены для моделирования крупномасштабной структуры в ионосфере и вряд ли позволят выявить узкие по широте структуры в масштабе до $1\text{--}2^\circ$ (Parker et al., 2018).

Цель нашей работы заключается в демонстрации возможности применения метода радиопросвечивания ионосферы Земли сигналами навигационных спутниковых систем для детектирования локальных особенностей в распределении электронной концентрации субавроральной ионосферы в зоне главного ионосферного провала с высоким пространственно-временным разрешением.

Главный ионосферный провал

Авроральная ионосфера и прилегающие к ней районы главного ионосферного провала являются индикаторами различных процессов в климатической системе «планета Земля – атмосфера». Наличие неоднородных структур в ионосфере арктической зоны — типичное состояние этой среды. Наиболее яркой и характерной структурной особенностью субавроральной ионосферы, существующей на границе среднеширотной и высокоширотной ионосферы, стал главный ионосферный провал — область пониженной концентрации электронов с отчётливым минимумом в широтном распределении электронной концентрации на высотах об-

ласти F ионосферы, включая концентрацию максимума F2-слоя (или критическую частоту этого слоя foF2) (Бенькова и др., 1993; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Гальперин и др., 1990; Трошичев, 1986), а также с наличием полярной и экваториальной стенок относительно этого минимума. Резкое изменение свойств ионосферы в области ГИП существенно влияет на коротковолновую (КВ) радиосвязь (Портнягина, Полех, 2010).

Впервые ГИП был зарегистрирован в 1960-х гг. при внешнем зондировании F2-слоя ионосферы со спутников серии Alouette (Muldrew, 1965). С тех пор проведены многочисленные исследования ГИП, однако многие вопросы — статистические и динамические характеристики, вариации формы и т.д. — остаются открытыми. Несмотря на то, что изучению физических процессов в области ГИП посвящено большое количество оригинальных исследований, обзор которых выполнен в ряде монографий и статей (Благовещенский, Жеребцов, 1987; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Гальперин и др., 1990; Жеребцов и др., 1988; Мизун, 1980; Трошичев, 1986; Aa et al., 2020; Moffett, Quegan, 1983), исследования особенностей ионосферных провалов и возможности их моделирования не теряют своей актуальности, поскольку затрагивают широкий круг проблем физики ионосферы, навигации, локации, КВ-радиосвязи, распространения радиоволн, прогнозирования состояния ионосферы и т.д. (Куркин и др., 2004; Портнягина, Полех, 2010; Тащилин, 2014; Karpachev et al., 2016; Parker et al., 2018; Pryse et al., 2006). Основные особенности структуры ионосферного провала, установленные при измерениях на спутниках и в результате наземных наблюдений, наиболее полно систематизированы и сформулированы в диссертационной работе А. В. Тащилина (2014) и указанных ранее монографиях и статьях. Они сводятся к следующему.

Главный ионосферный провал — устойчивое образование субавроральной ионосферы — представляет собой обширную область, расположенную на геомагнитных широтах $\sim 50\text{--}70^\circ$, в которой значения электронной концентрации значительно ниже по сравнению с окружающими областями. Глубина провала в электронной концентрации на высотах F2-области может составлять от 3–5 до 10 и более раз. Формы провала (т.е. вид зависимости электронной концентрации от широты) очень разнообразны: от широкой изрезанной долины до узкого глубокого минимума. Высокоширотная стенка провала обычно круче, чем низкоширотная (Брюнелли, Намгаладзе, 1988). Он может существовать длительное время, особенно в зимний период, преимущественно на ночной стороне. В это время провал регистрируется в 90 % наблюдений, в восходно-заходные часы — в 60 %, а днём он практически отсутствует (Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Тащилин, 2014). Его местоположение может изменяться в зависимости от времени суток и геомагнитной обстановки, более высокоширотное положение он занимает в послеполуденные часы, а наиболее низкоширотное — в ночные (Карпачев, 2003, 2008; Карпачев, Афонин, 1998). Средняя ширина провала в спокойных условиях составляет около 10° , с ростом геомагнитной возмущённости ширина провала уменьшается и положение его границ смещается к экватору. Он регистрируется как при низкой, так и при высокой солнечной активности, при этом его форма существенно изменяется в цикле солнечной активности (Беспрозванная, 1975; Индюков и др., 1986; Bates et al., 1973). В периоды высокой солнечной активности полярная стенка провала намного круче экваториальной, а концентрация на экваториальной стенке провала незначительно превышает значение концентрации в минимуме ГИП, экваториальная стенка имеет большую протяжённость по широте. В годы низкой солнечной активности обе стенки провала характеризуются наличием резких градиентов в электронной концентрации. Ширина экваториальной стенки провала $\Delta_\Sigma \approx 10\text{--}15^\circ$ значительно больше ширины полярной стенки $\Delta_{\text{пол}} \approx 3\text{--}5^\circ$. Кроме этого, вблизи экваториальной стенки провала, с экваториальной стороны, образуются узкие по широте ($1\text{--}2^\circ$) и протяжённые по долготе зоны с низким содержанием электронной концентрации (Тащилин, 2014).

Схема проведения измерений

Исследование возможности применения навигационных спутниковых систем для детектирования локальных особенностей главного ионосферного провала в зимнее время года было выполнено с помощью аппаратно-программного комплекса мониторинга ионосферы Земли

методом радиопросвечивания, обладающим высоким пространственно-временным разрешением и не требующим наличия сети наземных приёмников (Смирнов, Смирнова, 2010; Смирнов, Тынянкин, 2011; Смирнов и др., 2013). Метод позволяет получать высотное распределение электронной концентрации вдоль траектории движения подыоносферной точки с временным шагом 30 с в режиме реального времени, благодаря чему можно оперативно детектировать наличие узких локальных провалов в ионосфере. При такой дискретности получения данных метод обеспечивает высокое пространственное разрешение, которое зависит также и от зенитного угла наблюдения. Так, в диапазоне зенитных углов наблюдения 0–80° разрешение вдоль траектории подыоносферной точки, определяемой как точка пересечения луча зрения по трассе «наземный пункт – спутник» с максимумом слоя F2 ионосферы, высота которого находится из решения обратной задачи радиопросвечивания, составляет от 2 до 16 км (Смирнов, 2007). В режиме постобработки возможно снижение дискретности получения данных до 1 с.

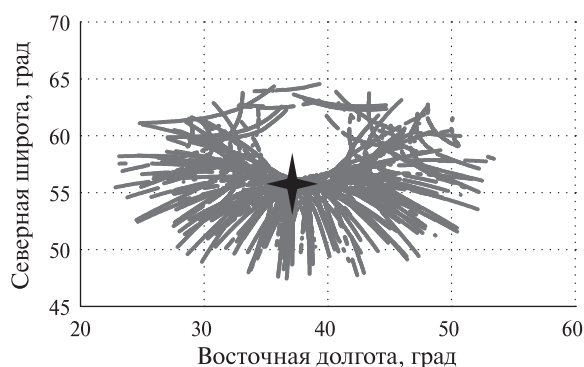


Рис. 1. Траектории подыоносферных точек в суточном сеансе измерений

На рис. 1 представлены траектории подыоносферных точек, полученные в течение суток с использованием одного наземного приёмника навигационных сигналов.

Комплекс располагается в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН в г. Фрязино Московской обл. и работает в непрерывном режиме с 2013 г. Основной элемент аппаратно-программного комплекса — модуль ионосферного обеспечения, основанный на реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли по трассе «наземный пункт – навигационный спутник». Необходимое условие существования модуля ионосферного обеспечения — наличие двухчастотного навигаци-

онного приёмника. В нашем случае используется двухчастотный навигационный приёмник фирмы NovAtel, работающий по сигналам навигационных систем GPS и ГЛОНАСС и позволяющий получать информацию об ионосфере в режиме реального времени. Приёмник принимает сигналы системы GPS, работающей на частотах 1227,6 и 1575,42 МГц и использующей кодовое разделение сигналов, и системы ГЛОНАСС, использующей частотное разделение сигналов и работающей на частотах $(1246 + k \times 0,4375)$ МГц и $(1602 + k \times 0,5625)$ МГц, где $k = -7 \dots +6$ — частотные литеры сигналов. Литер — это номер частотного канала. В системе ГЛОНАСС 14 частотных каналов и каждый спутник излучает сигналы на своих литерных частотах. Число литер меньше, чем спутников (24), поэтому спутники с одинаковыми литерами размещены по разные стороны земного шара (http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf). Дискретность поступления навигационной информации составляет 1 с, что обеспечивает высокое пространственно-временное разрешение. В соответствии с протоколом обмена данными в программном обеспечении приёмника принята сквозная нумерация навигационных спутников: для системы GPS зарезервированы номера с 1 по 32, для системы ГЛОНАСС — с 38 по 61.

Примерное расположение комплекса обозначено на рис. 1 крестиком. В течение суток с одного наземного приёмника можно получить информацию о распределении электронной концентрации более чем в 36 000 подыоносферных точках. Такое расположение траекторий подыоносферных точек обусловлено параметрами орбит навигационных спутниковых систем: наклонение орбит для спутников системы ГЛОНАСС составляет 65°, для системы GPS — 55°. В отличие от ионозондов вертикального зондирования метод радиопросвечивания позволяет получать информацию об ионосфере на площади более 3 млн км².

Геофизическая обстановка в период проведения измерений была спокойной. По данным Института земного магнетизма и распространения радиоволн, в течение суток планетар-

ный индекс геомагнитной активности не превышал 2 (<https://geodata.izmiran.ru>). Заметных естественных возмущений гелиофизической обстановки в период проведения измерений не наблюдалось.

Результаты применения метода радиопросвечивания

В качестве примера на *рис. 2* приведены результаты мониторинга состояния ионосферы, полученные по наблюдениям спутника № 53 системы ГЛОНАСС, что соответствует спутнику № 16 по точке расположения или R16 в формате обмена данными для файлов исходных данных спутниковых навигационных приёмников RINEX (Receiver Independent Exchange Format) и спутнику № 5 системы GPS. Для удобства сравнения полученных результатов значения критической частоты foF2, представленные на *рис. 2*, были отнормированы на максимальное значение на указанном временном интервале.

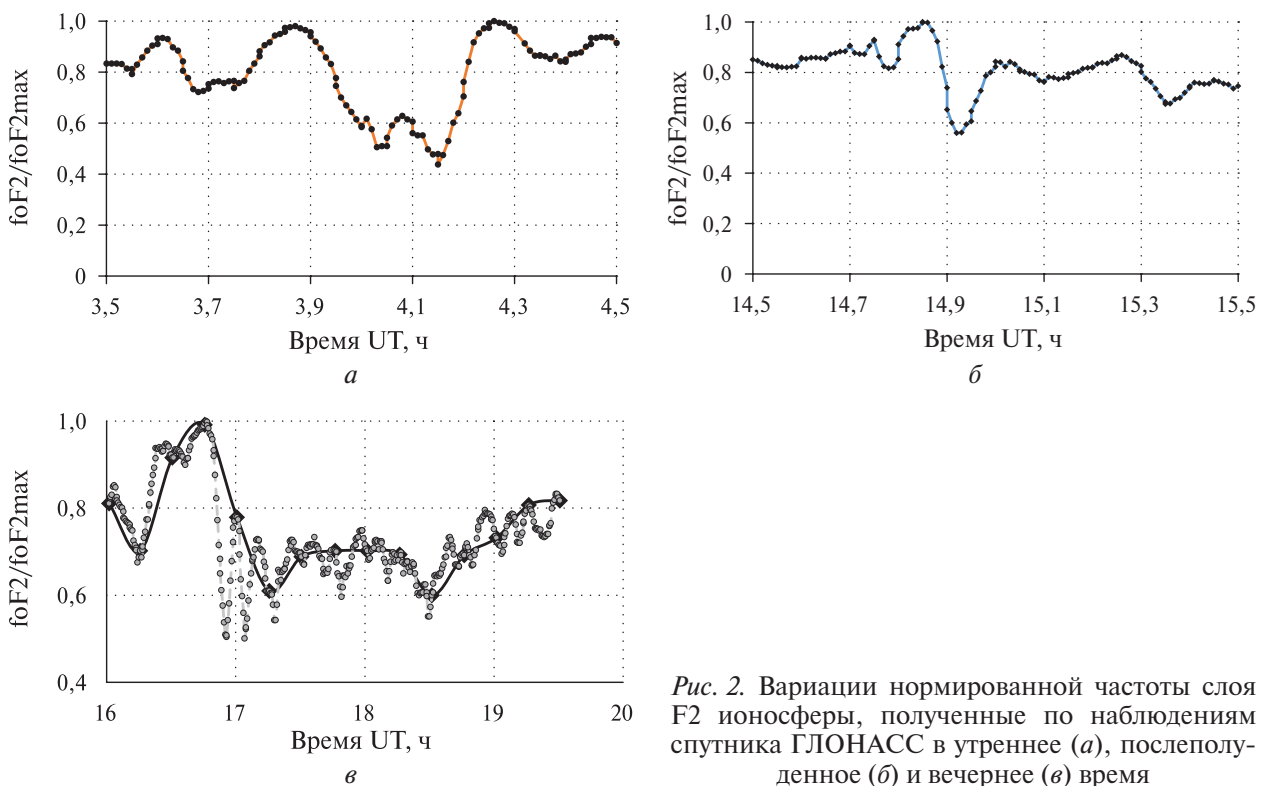


Рис. 2. Вариации нормированной частоты слоя F2 ионосферы, полученные по наблюдениям спутника ГЛОНАСС в утреннее (а), послеполуденное (б) и вечернее (в) время

Траектории движения спутников представлены на *рис. 3* (см. с. 234). Спутник № 53 наблюдался в утреннее время (с 03:00 до 07:00 UT, локальное местное время — 06:00–10:00) и послеполуденное (вечернее) (с 12:00 до 16:00 UT, локальное местное время — 15:00–19:00) примерно на одних и тех же широтах. Стрелками на рисунке указано направление движения спутника. Как видно, траектории движения спутника в разное время суток практически симметричны и пересекают одни и те же широты. Спутник № 5 системы GPS наблюдался в вечернее – ночное время (с 16:00 до 20:00 UT, локальное местное время — 19:00–23:00).

На графиках хорошо видно значимое уменьшение критической частоты в указанном диапазоне широт и наличие локального максимума (указано стрелкой). Максимальное значение в области понижения соответствует примерно одной и той же широте. Эта область наблюдалась как утром, так и вечером. Координаты подионосферной точки с локальным минимумом значения критической частоты соответствуют $33,34^\circ$ в.д. и $57,38^\circ$ с.ш. для времени наблюдения 04:09 UT; $42,46^\circ$ в.д. и $58,57^\circ$ с.ш. — для времени наблюдения 14:52 UT; $31,91^\circ$ в.д. и $57,74^\circ$ с.ш. — для 16:56 UT. На *рис. 3* данные позиции отмечены ромбиком. Как видно, эти

точки локального минимума наблюдались при разных азимутальных направлениях относительно расположения приёмника. Следует также обратить внимание, что характер изменения критической частоты в данной области существенно отличается в утреннее и вечернее время.

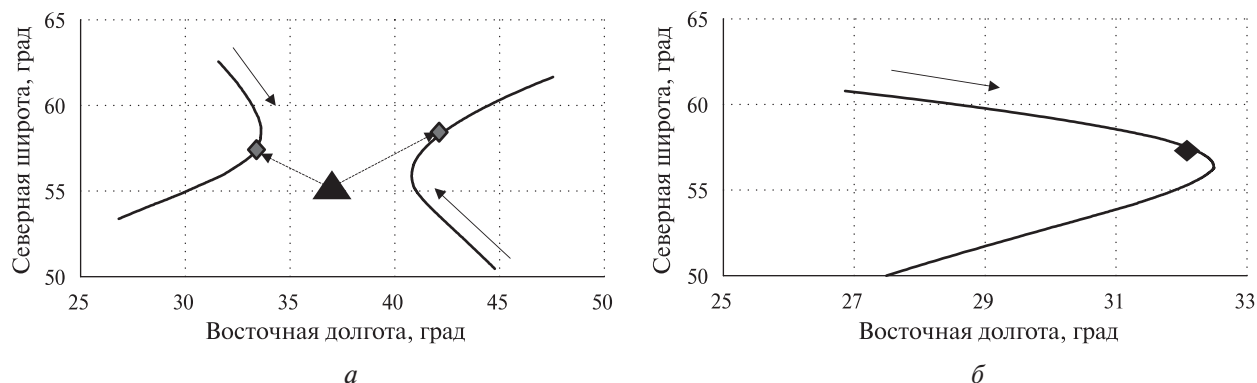


Рис. 3. Траектории движения подионосферных точек: а — для спутника ГЛОНАСС, слева — в утренние часы, справа — в послеполуденное (вечернее) время; б — для спутника GPS

В утреннее время область пониженной электронной концентрации более широкая и имеет дополнительные минимумы помимо основного, на дне провала наблюдается незначительное увеличение электронной концентрации. Увеличение электронной концентрации в главном ионосферном провале было продемонстрировано также в работе (Ahmed et al., 1979). Стенки локального провала достаточно симметричны относительно его середины. Значение критической частоты в минимуме провала в 2,5 раза меньше по сравнению со значениями на границах, что соответствует уменьшению электронной концентрации более чем в 6 раз. Ширина провала в утреннее время суток составила около 0,9°.

В послеполуденное (вечернее) время форма провала в некоторой степени повторяется. Однако, как видно из рис. 2б, левая стенка провала выглядит более крутой по сравнению с правой, при этом значение критической частоты до провала примерно на 20 % превышает значение после провала. В вечернее время форма провала далека от симметрии относительно дна, при этом стенки провала достаточно симметричны относительно его середины. Значение критической частоты в минимуме провала примерно в 2 раза меньше по сравнению со значениями на границах, что соответствует уменьшению электронной концентрации в 4 раза. Ширина основного локального провала в вечернее время суток составила около 0,5°. Однако если ширину провала определять по максимальным значениям, то она в этом случае составит около 1,7°. Сопоставление поведения области пониженной электронной концентрации с приведёнными ранее параметрами и особенностями главного ионосферного провала показывает, что столь узкий провал в значении электронной концентрации может быть классифицирован как аномалия положения плазмапаузы (Ружин и др., 2014).

Обнаруженная узкая зона провала наблюдалась по данным всех спутников, траектории подионосферных точек для которых находились на широтах 57–59° с. ш. в утренние, вечер-

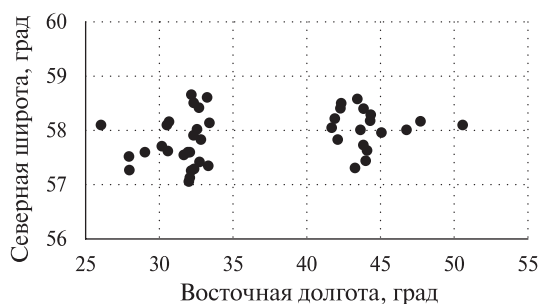


Рис. 4. Географические координаты провала электронной концентрации

ние и ночные часы. Не было обнаружено таких аномалий только в период с 08:00 до 14:00. Координаты положения провала, обнаруженного в течение суток по данным навигационных спутниковых систем, приведены на рис. 4. Следует заметить, что провал регистрировался при азимутах наблюдения примерно 40–65° и 290–320° и углах места от 20 до 40°. В частности, 57–59° с. ш. субавроральной ионосферы — зоны перехода от среднеширотной ионосферы к высокоширотной. В работе (Бенькова и др., 1993) указано, что зона 58–62° инвариантной широты соответствует

в магнитосфере плазмопаузе и внутренней границе плазменного слоя. Здесь наиболее ярко проявляются ионосферно-магнитосферные взаимодействия, так как активно работают все три канала ионосферно-магнитосферных связей: высыпание энергичных частиц, проникновение электрических полей и обмен холодной плазмой между ионосферой и плазмосферой (Деминов, Шубин, 1987; Chappell, 1988). Существование же столь узкой зоны провала может свидетельствовать как о расслоении главного ионосферного провала (Шаповалова и др., 2003), так и о наличии узких провалов электронной ионизации (Тащилин, 2014).

Учитывая, что главный ионосферный провал преимущественно образуется в ночное время (Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Тащилин, 2014; Трошичев, 1986; Shagimuratov et al., 2018), результаты *рис. 2а, б* следует отнести к моментам его «исчезновения» и «возникновения» на этих широтах. Полную картину главного ионосферного провала дают результаты, полученные по данным спутника № 5 системы GPS. Они показаны на *рис. 2в*. Здесь хорошо видно поведение электронной концентрации, характерное для главного ионосферного провала. Отчётливо наблюдается крутая полярная стенка провала и относительно плавное изменение электронной концентрации в экваториальной стенке. Общая ширина главного ионосферного провала составила в этом случае около 8° , что хорошо согласуется с данными других авторов (Aa et al., 2020; Ahmed et al., 1979; Parker et al., 2018).

Следует также обратить внимание, что детектирование таких узких зон провалов в значениях электронной концентрации сильно зависит от дискретности получения результатов наблюдения. Так, например, приведённые на *рис. 2в* результаты получены для дискретности 30 с (линия с кружками) и 15 мин (сплошная линия). 15 мин — это штатная дискретность выдачи данных наблюдений наземными ионозондами. Траектория движения подыоносферных точек для этого спутника была приведена на *рис. 3б*. Рисунок наглядно демонстрирует различие в получаемой структуре главного ионосферного провала. Именно возможность получения результатов наблюдения с высокой дискретностью позволяет реконструировать детальную картину распределения электронной концентрации в главном ионосферном провале.

Заключение

Применение метода радиопросвечивания ионосферы Земли с использованием высокоорбитальных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС позволяет проводить длительные и непрерывные наблюдения за состоянием околоземной плазмы с высоким пространственно-временным разрешением. С использованием только одного навигационного приёмника было прослежено в течение суток аномальное и устойчивое положение плазмопаузы в достаточно широком диапазоне долготы: от 25° до 55° . Обладая высоким пространственно-временным разрешением, метод радиопросвечивания позволяет детектировать узкие провалы и пики ионосферной ионизации, присущие субавроральной ионосфере. Обнаруженная узкая зона провала электронной концентрации наблюдалась по данным всех спутников, траектории подыоносферных точек для которых находились на широтах $57\text{--}59^\circ$ с. ш. в утренние, вечерние и ночные часы. Ширина провала в утреннее время суток составила около $0,9^\circ$ (примерно 50 км), в вечернее — около $0,5^\circ$ (примерно 28 км). При этом наблюдалось уменьшение электронной концентрации более чем в 6 раз в утреннее время и в 4 раза — в вечернее. Ширина главного ионосферного провала для наблюдаемого региона составила примерно 8° , что не противоречит известным из литературы данным.

Следует также обратить внимание на существование области повышенной электронной концентрации в ионосферном провале, т.е. имеет место как бы его «расслоение». Объяснение этого факта, приведшего к формированию необычных распределений электронной концентрации в субавроральной области ионосферы, оказывается сложной задачей, решение которой может пролить свет на некоторые проблемы физики формирования ионосферных провалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Литература

1. Андреева Е. С., Галинов А. В., Куницын В. Е., Мельниченко Ю. А., Терещенко Е. Д., Филимонов М. А., Черняков С. М. Радиотомографическая реконструкция провала ионизации околосредней плазмы // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. 1990. Т. 52. № 3. С. 783–785.
2. Бенькова Н. П., Козлов Е. Ф., Коченова Н. А., Саморокин Н. И., Флигель М. Д. Структура и динамика субавроральной ионосферы. М.: Наука, 1993. 144 с.
3. Беспрозванная А. С. Планетарное распределение ночной ионизации в максимуме слоя F2 по данным наземного зондирования ионосферы // Тр. Аркт. и антаркт. научно-исследоват. ин-та. Л.: Гидрометеоздат, 1975. Т. 322. С. 195–197.
4. Благовещенский Д. В., Жеребцов Г. В. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 271 с.
5. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
6. Гальперин Ю. И., Сивцева Л. Д., Филиппов В. М., Халипов В. Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука. СО РАН, 1990. 192 с.
7. Демин М. Г., Шубин В. Н. Динамика субавроральной ионосферы в возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. № 3. С. 398–403.
8. Жеребцов Г. А., Мизун Ю. Г., Мингалев В. С. Физические процессы в полярной ионосфере. М.: Наука, 1988. 232 с.
9. Индюков А. Е., Климов Н. Н., Васильев Г. В., Флигель М. Д. О положении главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования // Высокоширотная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи: сб. науч. тр. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1986. С. 67–71.
10. Карпачев А. Т. Зависимость формы ГИП от долготы, высоты, сезона, местного времени, солнечной и магнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 2. С. 256–269.
11. Карпачев А. Т. Крупномасштабная структура плазмы верхней ионосферы по данным спутниковых наблюдений // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / под ред. В. Е. Фортова. М.: Янус-К, 2008. Сер. Б. Ч. 3. С. 381–446.
12. Карпачев А. Т., Афонин В. В. Зависимость вероятности наблюдения ионосферных провалов от сезона, местного времени, долготы и уровня магнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т. 38. № 3. С. 79–91.
13. Куркин В. И., Пономарчук С. Н., Смирнов В. Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 5. С. 124–127.
14. Мизун Ю. Г. Полярная ионосфера. Л.: Наука, 1980. 214 с.
15. Портнягина О. Ю., Полех Н. М. Влияние положения главного ионосферного провала на характеристики КВ-радиоволн на трассе Норильск – Иркутск // Российская науч. конф. «Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой»: сб. докл. 6–10 сент. 2010. Улан-Удэ. 2010. С. 302–311.
16. Ружин Ю. Я., Парро М., Смирнов В. М., Денуев В. Х. Аномалия положения плазмопаузы и ионосферного провала по данным спутника DEMETER // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 6. С. 780–788.
17. Смирнов В. М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИРЭ РАН, 2007. 299 с.
18. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 6. 16 с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
19. Смирнов В. М., Тынянкин С. И. Способ определения параметров ионосферы и устройство для его осуществления. Патент РФ 2421753. Рег. 20.06.2011.
20. Смирнова Е. В., Смирнов В. М., Скобелкин В. Н., Тынянкин С. И., Мальковский А. П. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени // Гелиогеофиз. исслед. 2013. Вып. 4. С. 32–38.
21. Тацлин А. В. Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014, 265 с.
22. Трошичев О. А. Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
23. Туманова Ю. С., Андреева Е. С., Нестеров И. А. Наблюдения ионосферного провала над Европой при разных уровнях геомагнитной возмущенности по данным радиотомографии // Ученые записки физ. фак. 2016. № 3. С. 163906.
24. Шаповалова Ю. А., Намгаладзе А. А., Намгаладзе А. Н., Худукон Б. З. Расслоение главного ионосферного провала как эффект несовпадения географической и геомагнитной осей Земли // Вестн. Мурманского гос. техн. ун-та. 2003. Т. 6. № 1. С. 171–177.

25. *Aa E., Zou S., Erickson P.J., Zhang S.-R., Liu S.* Statistical analysis of the main ionospheric trough using Swarm in situ measurements // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2020. V. 125. Iss. 3. Art. No. e2019JA027583. 17 p. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JA027583>.
26. *Ahmed M., Sagalyn R. C., Wildman P.J.L., Burke W.J.* Topside Ionospheric Trough Morphology: Occurrence Frequency and Diurnal, Seasonal, and Altitude Variations // *J. Geophysical Research*. 1979. V. 84. No. A2. P. 498–498.
27. *Bates H. F., Belon A. E., Hansucker R. D.* Aurora and the poleward edge of the main ionospheric trough // *J. Geophysical Research*. 1973. V. 78. No. 4. P. 648–658.
28. *Chappell C. R.* The terrestrial plasma source: A new perspective in solar-terrestrial processes from Dynamics Explorer // *Reviews of Geophysics*. 1988. V. 26. No. 6. P. 229–248.
29. *Ciraolo L., Spalla P.* Preliminary study of the latitudinal dependence of TEC // *Advances in Space Research*. 1998. V. 22. No. 6. P. 807–810.
30. *He M., Liu L., Wan W., Zhao B.* A study on the nighttime midlatitude ionospheric trough // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. Iss. A5. Art. No. A05315. 11 p. DOI: 10.1029/2010JA016252.
31. *Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Pustovalova L. V.* Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016. V. 146. P. 149–159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.05.008>.
32. *Kersley L., Pryse S. E., Walker I. K., Heaton J. A. T., Mitchell C. N., Williams M. J., Willson C. A.* Imaging of electron density troughs by tomographic techniques // *Radio Science*. 1997. V. 32. P. 1607–1621.
33. *Krankowski A., Shagimuratov I. I., Ephishov I. I., Krypiak-Gregoreczyk A., Yakimova G.* The occurrence of the midlatitude ionospheric trough in GPS-TEC measurements // *Advances in Space Research*. 2009. V. 43. P. 1721–1731.
34. *Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S., Khudukon B. Z., Melnichenko Y. A.* Radiotomographic investigations of ionospheric structures at auroral and middle latitudes // *Annales Geophysicae*. 1995. V. 13. P. 1351–1359.
35. *Liu Y., Xiong C.* Morphology evolution of the mid-latitude ionospheric trough in nighttime under geomagnetic quiet conditions // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2020. V. 125. Iss. 8. Art. No. e2019JA027361. 14 p. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JA027361>.
36. *Mitchell C. N., Spencer P. S. J.* A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS // *Annales Geophysicae*. 2003. V. 46. P. 687–696. URL: <https://doi.org/10.4401/ag-4373>.
37. *Moffett R. J., Quegan S.* The Mid-Latitude trough in the Electron Concentration of the Ionospheric F-Layer: A Review of Observations and Modelling // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1983. V. 45. P. 315–343. URL: [https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(83\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(83)80038-5).
38. *Muldrew D. B.* F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // *J. Geophysical Research*. 1965. V. 70. No. 11. P. 2635–2650.
39. *Natali M. P., Castaño J. M., Meza A.* The northern and southern mid-latitude ionospheric trough using global IGS vTEC maps // *Advances in Space Research*. 2020. V. 65. Iss. 9. P. 2119–2130.
40. *Parker J. A. D., Pryse S. E., Jackson-Booth N., Buckland R. A.* Modelling the main ionospheric trough using the Electron Density Assimilative Model (EDAM) with assimilated GPS TEC // *Annals of Geophysics*. 2018. V. 36. P. 125–138. URL: <https://doi.org/10.5194/angeo-36-125-2018>.
41. *Perevalova N. P., Romanova E. B., Tashchilin A. V.* Detection of high-latitude ionospheric structures using GNSS // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020. V. 207. Art. No. 105335. 14 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105335>.
42. *Pryse S. E., Kersley L., Rice D. L., Russell C. D., Walker I. K.* Tomographic imaging of the ionospheric mid-latitude trough // *Annales Geophysicae*. 1993. V. 11. P. 144–149.
43. *Pryse S. E., Kersley L., Malan D., Bishop G. J.* Parameterization of the main ionospheric trough in the European sector // *Radio Science*. 2006. V. 41. Iss. 5. Art. No. RS5S14. 9 p. DOI: 10.1029/2005RS003364.
44. *Shagimuratov I. I., Chernouss S. A., Yakimova G. A., Efshov I. I., Filatov M. V.* Occurrence of the main ionospheric trough in GPS/GLONASS TEC measurements // *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XLI Annual Seminar. Apatity*, 2018. P. 114–117. DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.114-117.
45. *Wildman P.J.L., Sagalin R. C., Ahmed M.* Structure and morphology of the main plasma trough in the topside ionosphere: preprint / Air Force Geophysical Lab. Hanscom AFB, MA. 1976. 12 p.
46. *Yang N., Le H., Liu L.* Statistical analysis of ionospheric mid-latitude trough over the Northern Hemisphere derived from GPS total electron content data // *Earth Planets Space*. 2015. V. 67. Art. No. 196. 11 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0365-1>.

On the possibility of detecting local features of the main ionospheric trough zone using data from navigation satellite systems

V. M. Smirnov, E. V. Smirnova

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru*

This work is devoted to demonstrating the possibility of using the radio translucence method of the Earth's ionosphere with signals from navigation satellite systems to study the peculiarities of the state of the subauroral ionosphere in the main ionospheric trough, which manifested themselves in the abnormal position of the plasmopause and a decrease in the electron concentration. The anomaly detected during the processing of experimental data obtained in the process of continuous monitoring of the ionosphere state, carried out with the help of a hardware-software complex operating based on data from the mean-orbit navigation satellite systems GPS and GLONASS. The resulting effect in the form of a sharp decrease in the electron concentration in the F2-layer of the ionosphere observed at latitudes 57–59° and in two longitudinal sectors, approximately 25–35° and 40–50° eastern longitude. Detected area of the local decrease in electron concentration observed according to the data of all satellites, the trajectories of the subionospheric points for which were located at latitudes 57–59° in the morning, evening and night hours. The local dip width in the morning time of the day was about 0.9°, the width of the main local dip in the evening was about 0.5°. At the same time, a decrease in the electron concentration observed more than 6 times in the morning, and 4 times in the evening. The width of the main ionospheric trough was in this case about 8°.

Keywords: ionosphere, electron concentration, navigation satellite systems, auroral zone, main ionospheric trough, hardware-software complex, radio translucence

Accepted: 26.01.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-229-240

References

1. Andreeva E. S., Galinov A. V., Kunitsyn V. E., Melnichenko Yu. A., Tereshchenko E. D., Filimonov M. A., Chernyakov S. M., Radiotomograficheskaya rekonstruktsiya provala ionizatsii okolozemnoi plazmy (Radio-tomographic reconstruction of the near-earth plasma ionization dip), *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1990, Vol. 52, No. 3, pp. 783–785.
2. Benkova N. P., Kozlov E. F., Kochenova N. A., Samorokin N. I., Fligel M. D., *Struktura i dinamika subavroral'noi ionosfery* (Structure and dynamics of the subauroral ionosphere), Moscow: Nauka, 1993, 144 p.
3. Besprozvannaya A. S., Planetarnoe raspredelenie nochnoi ionizatsii v maksimume sloya F2 po dannym nazemnogo zondirovaniya ionosfery (Planetary distribution of nighttime ionization at the maximum of the F2 layer according to ground-based ionospheric sounding data), *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, Vol. 322, pp. 195–197.
4. Blagoveshchenskiy D. V., Zherebtsov G. V., *Vysokoshirotnye geofizicheskie yavleniya i prognozirovaniye korotkovolnovykh radiokanalov* (High-latitude geophysical phenomena and forecasting of short-wave radio channels), Moscow: Nauka, 1987, 271 p.
5. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A., *Fizika ionosfery* (Physics of the ionosphere), Moscow: Nauka, 1988, 528 p.
6. Galperin Yu. I., Sivtseva L. D., Filippov V. M., Khalipov V. L., *Subavroral'naya verkhnyaya ionosfera* (Subauroral upper ionosphere), Novosibirsk: Nauka, SO RAN, 1990, 192 p.
7. Deminov M. G., Shybin V. N., *Dinamika subavroral'noi ionosfery v vozmushchennykh usloviyakh* (Dynamics of the subauroral ionosphere under disturbed conditions), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1987, Vol. 27, No. 3, pp. 398–403.
8. Zherebtsov G. A., Mizun Yu. G., Mingalev V. S., *Fizicheskie protsessy v polyarnoi ionosfere* (Physical processes in the polar ionosphere), Moscow: Nauka, 1988, 232 p.
9. Induykov A. E., Klimov N. N., Vasil'ev G. V., Fligel M. D., O polozhenii glavnogo ionosfernogo provala po dannym vneshnego zondirovaniya (Position of the main ionospheric dip according to external sounding data), *Vysokoshirotnaya ionosfera i magnitosferno-ionosfernye svyazi*, Proc., Apatity, 1986, pp. 67–71.
10. Karpachev A. T., The dependence of the main ionospheric trough shape on longitude, altitude, season, local time, and solar and magnetic activity, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2003, Vol. 43, No. 2, pp. 239–251.

11. Karpachev A. T., Krupnomasshtabnaya struktura plazmy verkhnei ionosfery po dannym sputnikovykh nablyudeniim (Large-scale structure of the upper ionosphere plasma according to satellite observations), In: *Entsiklopediya nizkotemperaturnoi plazmy* (Encyclopedia of low-temperature plasma), V. E. Fortov (ed.), Moscow: Janus-K, 2008, Ser. B, Part 3, pp. 381–446.
12. Karpachev A. T., Afonin V. V., Zavisimost' veroyatnosti nablyudeniya ionosfernykh provalov ot sezona, mestnogo vremeni, dolgoty i urovnya magnitnoi aktivnosti (Dependence of the probability of observing ionospheric dips on the season, local time, longitude and level of magnetic activity), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1998, Vol. 38, No. 3, pp. 79–91.
13. Kurkin V. I., Ponomarchuk S. N., Smirnov V. F., O vliyaniy glavnogo ionosfernogo provala na kharakteristiki KV-signalov na trassakh naklonnogo zondirovaniya (On the influence of the main ionospheric trough on the characteristics of HF signals on the oblique sounding paths), *Solnechno-Zemnaya Fizika*, 2004, No. 5, pp. 124–127.
14. Mizun Yu. G., *Polyarnaya ionosfera* (Polar ionosphere), Leningrad: Nauka, 1980, 214 p.
15. Portnyagina O. Yu., Polekh N. M., Vliyanie polozheniya glavnogo ionosfernogo provala na kharakteristiki KV-radiovoln na trasse Noril'sk – Irkutsk (Influence of the position of the main ionospheric trough on the characteristics of HF-radio waves on the Norilsk – Irkutsk track), *Rossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoi aperturoi"* (Sensing of the earth covers with synthetic aperture radars: Proc. Conf.), 6–10 Sept., 2010, Ulan-Ude, 2010, pp. 302–311.
16. Ruzhin Y. Y., Parro M., Smirnov V. M., Depuev V. K., The Anomaly of plasmopause and ionospheric trough positions from demeter data, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2014, Vol. 54, No. 6, pp. 763–772.
17. Smirnov V. M., *Metod monitoringa ionosfery Zemli na osnove ispol'zovaniya navigatsionnykh sputnikovykh sistem: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (A method for monitoring the Earth's ionosphere based on the use of navigation satellite systems, Dr. phys.-math. sci. thesis), Moscow: IRE RAS, 2007, 299 p.
18. Smirnov V. M., Smirnova E. V., Modul' ionosfernogo obespecheniya na baze sputnikovykh sistem GPS/GLONASS (Ionospheric support module based on GPS/GLONASS satellite systems), *Zhurnal Radioelektroniki*, 2010, No. 6, 16 p., available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
19. Smirnov V. M., Tynyankin S. I., *Sposob opredeleniya parametrov ionosfery i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* (Method for determining the parameters of the ionosphere and a device for its implementation), Patent RU 2421753, Reg. 20.06.2011.
20. Smirnova E. V., Smirnov V. M., Skobelkin V. N., Tynyankin S. I., Malkovskiy A. P., Apparato-programmnyi kompleks dlya monitoringa sostoyaniya ionosfery v rezhime real'nogo vremeni (Hardware-software complex for monitoring the state of the ionosphere in real time), *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2013, Vol. 4, pp. 32–38.
21. Tashilin A. V., *Formirovanie krupnomasshtabnoi struktury ionosfery v spokoinykh i vozmushchennykh usloviyakh: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Formation of a large-scale structure of the ionosphere in calm and disturbed conditions, Dr. phys.-math. sci. thesis), Irkutsk: Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 2014, 265 p.
22. Troshichev O. A., *Ionosferno-magnitnye vozmushcheniya v vysokikh shirotakh* (Ionospheric-magnetic disturbances in high latitudes), Leningrad: Gydrometeoizdat, 1986, 256 p.
23. Tumanova Yu. S., Andreeva E. S., Nesterov I. A., Nablyudeniya ionosfernogo provala nad Evropoi pri raznykh urovnyakh geomagnitnoi vozmushchennosti po dannym radiotomografii (Observations of the ionospheric trough over Europe at different levels of geomagnetic disturbance according to radio tomography data), *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta*, 2016, No. 3, p. 163906.
24. Shapovalova Yu. A., Namgaladze A. A., Namgaladze A. N., Khudukon B. Z., Rassloenie glavnogo ionosfernogo provala kak effekt nesovpadeniya geograficheskoi i geomagnitnoi osei Zemli (Stratification of the main ionospheric trough as an effect of mismatching the geographic and geomagnetic axes of the Earth), *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2003, Vol. 6, No. 1, pp. 171–177.
25. Aa E., Zou S., Erickson P. J., Zhang S.-R., Liu S., Statistical analysis of the main ionospheric trough using Swarm in situ measurements, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2020, Vol. 125, Issue 3, Art. No. e2019JA027583, 17 p., available at: <https://doi.org/10.1029/2019JA027583>.
26. Ahmed M., Sagalyn R. C., Wildman P. J. L., Burke W. J., Topside Ionospheric Trough Morphology: Occurrence Frequency and Diurnal, Seasonal, and Altitude Variations, *J. Geophysical Research*, 1979, Vol. 84, No. A2, pp. 498–498.
27. Bates H. F., Belon A. E., Hansucker R. D., Aurora and the poleward edge of the main ionospheric trough, *J. Geophysical Research*, 1973, Vol. 78, No. 4, pp. 648–658.
28. Chappell C. R., The terrestrial plasma source: A new perspective in solar-terrestrial processes from Dynamics Explorer, *Reviews of Geophysics*, 1988, Vol. 26, No. 6, pp. 229–248.
29. Cirao L., Spalla P., Preliminary study of the latitudinal dependence of TEC, *Advances in Space Research*, 1998, Vol. 22, No. 6, pp. 807–810.
30. He M., Liu L., Wan W., Zhao B., A study on the nighttime midlatitude ionospheric trough, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, Issue A5, Art. No. A05315, 11 p., DOI: 10.1029/2010JA016252.

31. Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Pustovalova L. V., Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, Vol. 146, pp. 149–159, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.05.008>.
32. Kersley L., Pryse S. E., Walker I. K., Heaton J. A. T., Mitchell C. N., Williams M. J., Willson C. A., Imaging of electron density troughs by tomographic techniques, *Radio Science*, 1997, Vol. 32, pp. 1607–1621.
33. Krankowski A., Shagimuratov I. I., Ephishov I. I., Krypiak-Gregorczyk A., Yakimova G., The occurrence of the midlatitude ionospheric trough in GPS-TEC measurements, *Advances in Space Research*, 2009, Vol. 43, pp. 1721–1731.
34. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S., Khudukon B. Z., Melnichenko Y. A., Radiotomographic investigations of ionospheric structures at auroral and middle latitudes, *Annales Geophysicae*, 1995, Vol. 13, pp. 1351–1359.
35. Liu Y., Xiong C., Morphology evolution of the mid-latitude ionospheric trough in nighttime under geomagnetic quiet conditions, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2020, Vol. 125, Issue 8, Art. No. e2019JA027361, 14 p., available at: <https://doi.org/10.1029/2019JA027361>.
36. Mitchell C. N., Spencer P. S. J., A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS, *Annales Geophysicae*, 2003, Vol. 46, pp. 687–696, available at: <https://doi.org/10.4401/ag-4373>.
37. Moffett R. J., Quegan S., The Mid-Latitude trough in the Electron Concentration of the Ionospheric F-Layer: A Review of Observations and Modelling, *Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1983, Vol. 45, pp. 315–343, available at: [https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(83\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(83)80038-5).
38. Muldrew D. B., F-layer ionization troughs deduced from Alouette data, *J. Geophysical Research*, 1965, Vol. 70, No. 11, pp. 2635–2650.
39. Natali M. P., Castaño J. M., Meza A., The northern and southern mid-latitude ionospheric trough using global IGS vTEC maps, *Advances in Space Research*, 2020, Vol. 65, Issue 9, pp. 2119–2130.
40. Parker J. A. D., Pryse S. E., Jackson-Booth N., Buckland R. A., Modelling the main ionospheric trough using the Electron Density Assimilative Model (EDAM) with assimilated GPS TEC, *Annales Geophysicae*, 2018, Vol. 36, pp. 125–138, available at: <https://doi.org/10.5194/angeo-36-125-2018>.
41. Perevalova N. P., Romanova E. B., Tashchilin A. V., Detection of high-latitude ionospheric structures using GNSS, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, Vol. 207, Art. No. 105335, 14 p., available at: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105335>.
42. Pryse S. E., Kersley L., Rice D. L., Russell C. D., Walker I. K., Tomographic imaging of the ionospheric mid-latitude trough, *Annales Geophysicae*, 1993, Vol. 11, pp. 144–149.
43. Pryse S. E., Kersley L., Malan D., Bishop G. J., Parameterization of the main ionospheric trough in the European sector, *Radio Science*, 2006, Vol. 41, Issue 5, Art. No. RS5S14, 9 p., DOI: 10.1029/2005RS003364.
44. Shagimuratov I. I., Chernouss S. A., Yakimova G. A., Efishov I. I., Filatov M. V., Occurrence of the main ionospheric trough in GPS/GLONASS TEC measurements, *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XLI Annual Seminar*, Apatity, 2018, pp. 114–117, DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.114-117.
45. Wildman P. J. L., Sagalin R. C., Ahmed M., *Structure and morphology of the main plasma trough in the top-side ionosphere: preprint*, Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, MA, 1976, 12 p.
46. Yang N., Le H., Liu L., Statistical analysis of ionospheric mid-latitude trough over the Northern Hemisphere derived from GPS total electron content data, *Earth Planets Space*, 2015, Vol. 67, Art. No. 196, 11 p., available at: <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0365-1>.