

ВЗГЛЯД НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ ЧЕРЕЗ GPS И ГЛОНАСС



ЯСЮКЕВИЧ Юрий Владимирович,

кандидат физико-математических наук

ЯСЮКЕВИЧ Анна Сергеевна,

кандидат физико-математических наук

Институт солнечно-земной физики СО РАН

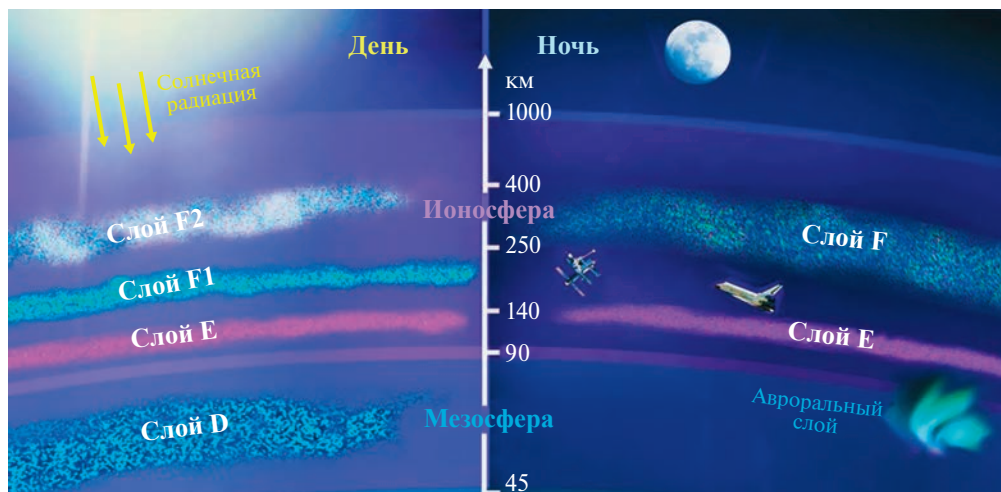
DOI: 10.7868/S0044394820040064

Ионосфера – это слой земной атмосферы, в котором содержится большое количество заряженных частиц. Заряженная составляющая ионосферы оказывает ключевое воздействие на распространение радиоволн, поэтому изучение состояния ионосферы является важной научно-практической задачей. Ионосфера Земли является сложной динамической системой, на которую влияют солнечный ветер, процессы в нейтральной атмосфере, магнитосфере и на Солнце. В статье рассмотрены возможности изучения ионосферы Земли с использованием глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS и ГЛОНАСС. Развитая глобальная сеть приемников сигналов GPS/ГЛОНАСС предоставила колоссальный экспериментальный материал

для изучения ионосферы и позволила по-новому взглянуть на происходящие в ней процессы.

ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ – ИНДИКАТОР ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Ионосферой называют часть Земной атмосферы, где имеется достаточно большое количество заряженных частиц: электронов, атомарных и молекулярных ионов (в основном кислородных). Иногда считают, что в ионосфере преобладают заряженные частицы. На самом деле это не так. Например, на высотах F-слоя (порядка 300 км), где концентрация заряженных частиц максимальна, нейтральных частиц в 20 раз



Строение ионосферы Земли. Сайт: www.bastabalkana.com

больше. Тем не менее именно заряженная составляющая ионосферы оказывает ключевое воздействие на распространение радиоволн. Так, благодаря наличию ионосферы возможно распространение радиосигнала вокруг Земли и загоризонтная радиолокация и радиосвязь. С другой стороны, различные неоднородности, присутствующие в ионосфере, оказывают существенное влияние на распространяющийся радиосигнал, могут создавать помехи и препятствовать устойчивой радиосвязи. Поэтому изучение состояния ионосферы оказывается важной задачей для радиофизики.

Ионосфера располагается от высот порядка 50 км до примерно 1000 км, однако не имеет жестких высотных границ. Нижняя ее граница определяется чувствительностью приборов для регистрации электронной концентрации. Верхняя граница постепенно переходит в плазмосферу (тоже заряженный слой, но состоящий преимущественно из электронов и протонов).

Важной особенностью ионосферы является то, что она чувствительно реагирует на процессы на Солнце и в бли-

жайших геосферах (нейтральной атмосфере, магнитосфере, литосфере). Возникающие в ионосфере волновые процессы искусственного или естественного происхождения могут распространяться на значительные расстояния. Характер этих волновых возмущений может дать дополнительную информацию о происходящих явлениях. Поэтому исследование процессов в ионосфере представляет интерес не только с практической точки зрения, но и для фундаментальных научных задач.

GPS/ГЛОНАСС И ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Как же навигационные спутниковые системы помогают в изучении ионосферы? Когда в 1960–1970-х годах шла разработка американской системы GPS (Global Positioning System) и российской системы ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система), перед инженерами и учеными стояла задача получить координаты с высокой точностью до десятков и единиц

метров. Для этого требовалось, чтобы навигационный спутник испускал сигнал на высоких частотах, поэтому навигационные системы работают в гигагерцовом диапазоне. Однако создателями систем было обнаружено, что даже на этих частотах ошибка, которая возникала в связи с распространением спутникового сигнала через ионосферу, достигала 20 м при высокой солнечной активности. Во время магнитных бурь ошибка увеличивалась до гораздо больших величин, особенно в регионах вблизи экватора, где в ионосфере располагается экваториальная аномалия – область повышенной электронной концентрации. В результате исследований было принято решение, что для оценки ионосферной ошибки необходимо использовать измерения на двух близких частотах. На каждой из частот ошибка зависит от частоты сигнала и прямо пропорциональна

суммарному (интегральному) числу электронов вдоль пути распространения радиосигнала от спутника до приемника. Рабочие частоты систем были выбраны в диапазоне $\sim 1,6$ ГГц (основная частота L_1) и $\sim 1,2$ ГГц (вспомогательная частота L_2). Комбинация измерений на двух разных частотах позволяет оценить ошибку, вносимую ионосферой, и убрать ее из навигационного решения.

С другой стороны, в руках исследователей оказались побочные измерения интегрального числа электронов (на первый взгляд исключительно мешающие нормальной работе). Эта величина получила название «Полного электронного содержания» (ПЭС), или в английской литературе – Total Electron Content (ТЕС). Единица измерения ПЭС представляет собой количество электронов в столбе с сечением один квадратный метр вдоль луча

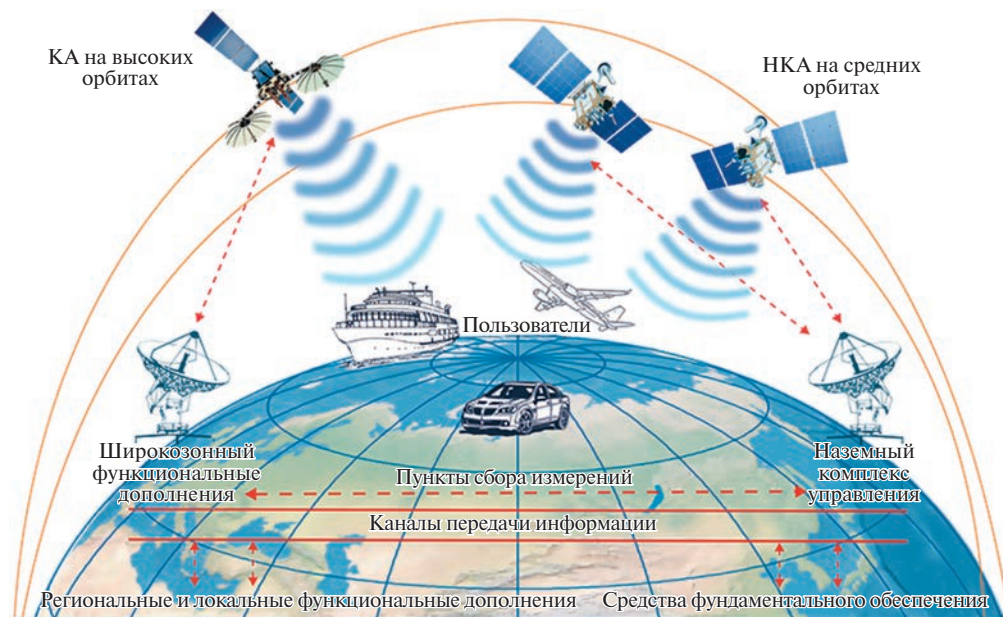
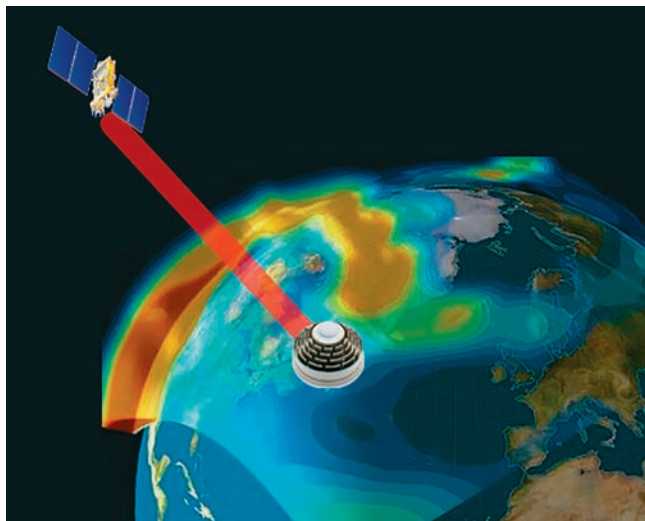


Схема работы российской системы ГЛОНАСС.

Сайт: <https://naukatehnika.com/zhizn-bez-sputnikov-novye-sistemy-navigacii.html>



Распространение спутникового сигнала до приемника, вдоль которого определяется ПЭС. Полное электронное содержание определяется вдоль луча спутник-приемник (красный цвет)

спутник-приемник, измеряемая в единицах TECu (10^{16} электронов/м²). Этот луч имеет наклон от вертикали, зависящий от взаимного расположения приемника и спутника. Такая геометрия распространения сигнала (и проведения измерений) типична для любых существующих в настоящее время двухчастотных спутниковых систем, включая американскую GPS (Navstar), отечественную ГЛОНАСС, европейскую Galileo, китайскую BeiDou (Compass), ряд региональных систем, а также дифференциальные дополнения SBAS.

Важным преимуществом GPS/ГЛОНАСС, по сравнению с другими методами исследования ионосферы, является глобальность спутниковой группировки, обеспечивающая одновременное наблюдение в любой точке земного шара не менее четырех спутников каждой из систем. При этом на средних и экваториальных широтах

в настоящее время может наблюдаться одновременно до 40 спутников разных систем: GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (ЕС), BeiDou (Китай).

Для приема спутникового сигнала на двух частотах требуются специализированные приемники. Глобальность инструмента обусловлена также тем, что сеть таких специализированных приемных станций активно развивается. Данные многих приемников свободно пред-

ставляются в сети Интернет. В настоящее время в свободном доступе находятся данные с около 5000 приемников. Существуют сети, данные которых могут быть получены по запросу для научных исследований. Например, плотная японская сеть GSI (1200 станций на территории Японии), сеть SMART-NET или сети NIVE и EFT-CORS на территории России. То есть, благодаря измерениям GPS/ГЛОНАСС, исследователи могут получить данные об ионосфере практически по всему миру.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ КАРТЫ И ГЛОБАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

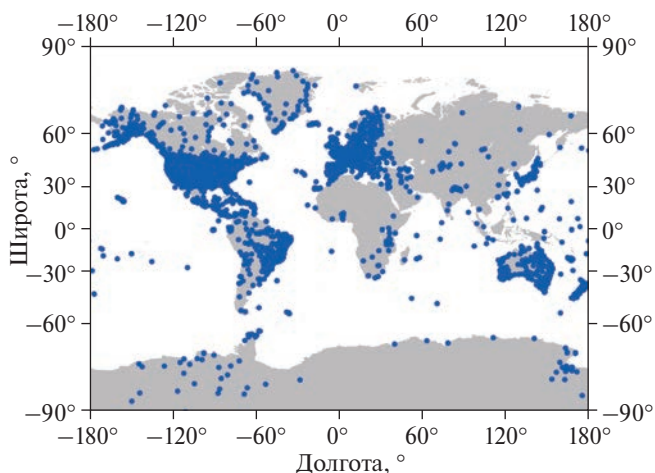
Широкое покрытие сети приемников позволило ученым получать измерения ПЭС практически по всему миру и на основе этих измерений рассчитывать глобальные ионосферные карты (Global Ionosphere Maps – GIM). Эти карты представляют собой сетку размером 5° по долготе и 2,5° по широте. В каждом узле сетки содержится значение ПЭС в заданный момент времени. В настоящее время такие карты рассчитываются в нескольких лабора-

ториях и предоставляются в свободное пользование. Приведем пример глобальной карты ПЭС, рассчитанной Лабораторией реактивного движения США (JPL, NASA), для 17 марта 2015 г. в 22 часа всемирного времени (UT), во время сильной геомагнитной бури. На ней можно заметить, что электронная концентрация в ионосфере распределяется неравномерно. Наибольшее количество электронов наблюдается в дневное время в приэкваториальных областях, где образуются два гребня экваториальной аномалии. Гребни располагаются симметрично относительно геомагнитного экватора.

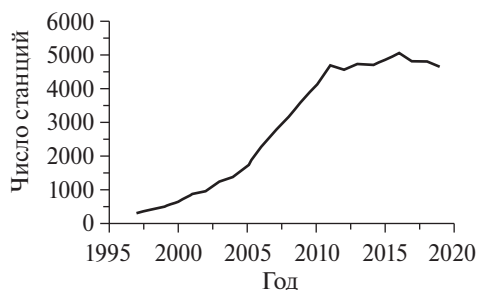
На основе таких карт возможно рассчитать величину, представляющую суммарное количество электронов во всей ионосфере – Глобальное электронное содержание (ГЭС). Единица измерения ГЭС – GECu (Global Electron Content unit) равна 10^{32} электронов.

ГЭС позволяет проводить исследования процессов, оказывающих влияние на ионосферу в глобальном масштабе. Так, динамика ГЭС строго следует за изменением солнечной активности – наиболее важный фактор для электронной концентрации ионосферы, поскольку интенсивность солнечного излучения влияет на ионизацию частиц. ГЭС изменяется от 0,35 до 3,15 GECu в 23–24-х циклах солнечной активности, то есть почти в 10 раз. Максимумы 23-го и 24-го солнечных циклов согласуются с максимальными значениями ГЭС, а минимумы – минимальным значениям ГЭС.

В циклах солнечной активности хорошо выражены колебания ГЭС с периодом 1 год, 0,5 года, 27 дней и 1 день.

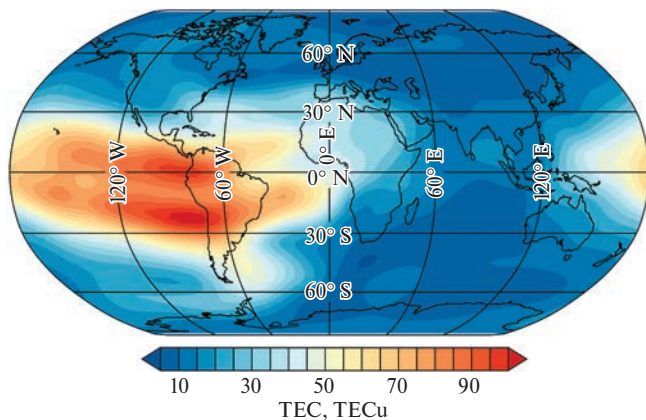


Расположение приемников навигационных систем с данными в свободном доступе на 1 января 2018 г.



Динамика числа приемных станций навигационных систем с данными в свободном доступе в 1997–2019 гг.

Годовая периодика связана с движением Земли по орбите вокруг Солнца. Полугодовые колебания отсутствуют в спектре солнечного излучения. В ГЭС полугодовая вариация обусловлена изменением системы нейтральных атмосферных ветров: нейтральный ветер на высотах ионосферы дует от летнего теплого полушария к зимнему, а в весенний и осенний периоды такой ветер отсутствует. 27-дневные вариации связаны с вращением Солнца: движе-



Пример глобальной карты ПЭС 17 марта 2015 г. Оттенками цвета показаны значения ПЭС в единицах TECu. По данным JPL, NASA



График глобального электронного содержания (по оси ординат отложены единицы GECU – 10^{32} электронов) в 23-м и 24-м циклах солнечной активности. Изменчивость ГЭС не только связана с 11-летним солнечным циклом, но и более быстрыми вариациями. По данным SIMuRG

ние активных областей при вращении Солнца приводит к изменениям потока солнечного излучения, что в свою очередь влияет на число электронов в ионосфере. Интересно отметить, что 27-дневные вариации максимальны на подъеме и на спаде солнечной активности, когда активных областей на Солнце уже достаточно (не минимум цикла), но еще и не настолько много (не максимум цикла), чтобы «замаскировать» модуляцию. Полугодовые и годовые вариации, напротив – максимальны в максимуме цикла и убывают с уменьшением солнечной активности. Суточные вариации в ГЭС – это проявление долготной асимметрии: на разных долготах электронная концентрация ионосферы немного отличается в одно и то же локальное время. Одна из основных причин такой асимметрии – наклон оси магнитного поля Земли.

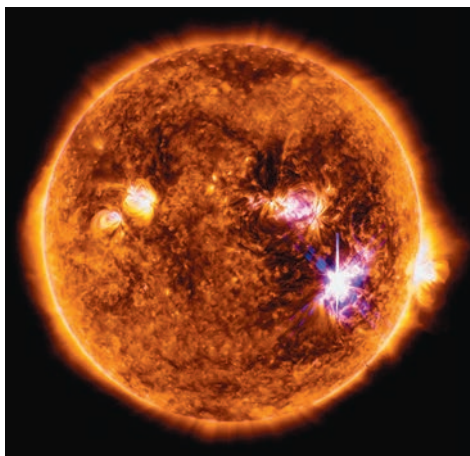
СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Вариации ПЭС на дневной стороне

Солнечная вспышка представляет собой высвобождение солнечной энергии в широком спектре длин волн, в том числе рентгеновском и ультрафиолетовом. Ультрафиолетовая часть спектра влияет на формирование F-слоя ионосферы, который располагается на высотах более 150 км и характеризуется максимальной электронной концентрацией. Солнечное излучение в рентгеновском диапазоне влияет на формирование D-слоя толщиной 60–90 км, ответственного за поглощение радиоволн.

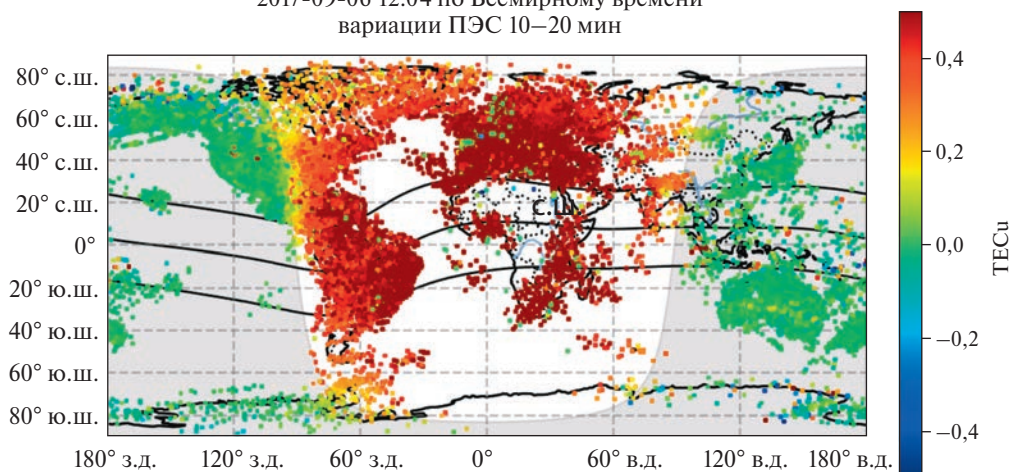
Во время вспышки на Солнце происходит резкое увеличение ионизации на всей освещенной стороне ионосферы. Для выявления «тонких» эффектов

Серия вспышек на Солнце произошла 4–7 сентября 2017 г. 6 сентября произошла самая мощная вспышка за 12 лет, достигшая уровня X9.3. Снимок SDO NASA



Вариации ПЭС во время солнечной вспышки X9.3 6 сентября 2017 г. Карта представлена для 12:04:00 по Всемирному времени. Шкала справа указывает амплитуду вариаций ПЭС (единицы измерения – TECu). Затемненная область соответствует ночной стороне Земли. По данным SIMuRG

2017-09-06 12:04 по Всемирному времени
вариации ПЭС 10–20 мин

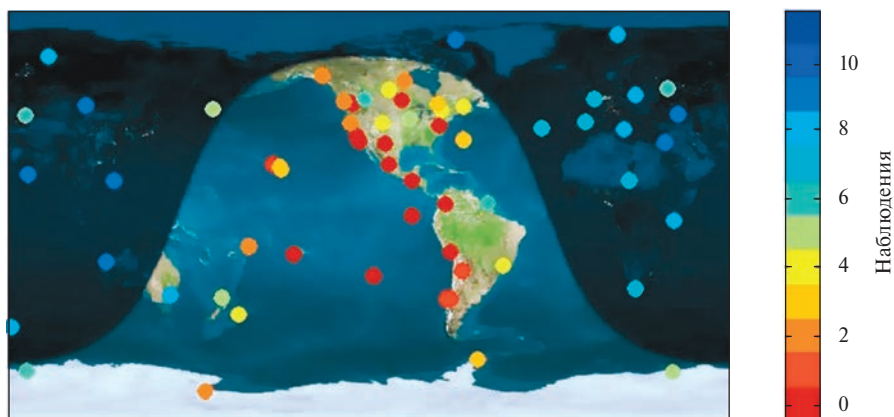


в ионосфере и исследования ионосферных неоднородностей во многих случаях удобно вместо непосредственно величины полного электронного содержания анализировать его вариации, то есть колебания ПЭС в определенном диапазоне периодов. Например, во время солнечной вспышки X9.3 6 сентября 2017 г. отчетливо наблюдалась положительная вариация, показывающая синхронный рост электронного содержания на всей освещенной стороне ионосферы. Если вспышка достаточно мощная (X-класс, или хотя бы M-класс),

то эффект отчетливо наблюдается на всех лучах приемник–спутник.

Для слабых вспышек C-класса выявить эффект на отдельных лучах нельзя. Однако за счет того, что солнечная вспышка синхронно оказывает воздействие на всей освещенной стороне, суммирование измерений ПЭС по всем лучам дает возможность определять отклик в ионосфере даже на слабые вспышки. Отметим, что такой слабый эффект затруднительно выделить другими средствами диагностики ионосферы, даже очень чувствительными.

Международная сеть наблюдений, 6 декабря 2006 г.



19 ч 34 мин 00 с по Всемирному времени



Количество спутников GPS, сигнал с которых регистрируется приемниками международной сети, 6 декабря 2006 г. (вверху) во время сильной радиовспышки на Солнце. Точки показывают положение приемников, их цвет показывает, сигнал со скольких спутников GPS можно было зарегистрировать приемником в различных регионах земного шара. Желтый цвет означает, что наблюдается 4 спутника и навигация еще возможна, оранжевый и красный – навигация по GPS невозможна. Изменения потока солнечного радиоизлучения на частоте 1,6 ГГц показаны на графике внизу. По данным Корнельского университета (<https://gps.ece.cornell.edu>)

Анализ количественного воздействия солнечной вспышки на ионосферу в глобальном масштабе позволяет детектировать проявление реакции ионосферы в реальном времени, а также оценить интенсивность потока солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне.

Солнечная вспышка как угроза стабильности

Солнечная вспышка может быть не только предметом изучения, но и являться угрозой стабильности функционирования навигационных спутни-

ковых систем. Связано это с тем, что Солнце во время вспышек может излучать, в том числе, и в той части диапазона частот, в которой работают системы GPS и ГЛОНАСС (1,2–1,6 ГГц). Достаточно сильный радиовсплеск может привести к значительному возрастанию шума на входе приемной аппаратуры. Хотя такие вспышки происходят нечасто, они время от времени случаются. Солнечные радиовсплески классифицируют согласно величине потока радиоизлучения S. В период 1997–2016 гг. произошло 120 сильных ($1000 < S \leq 10\,000$ солнечных единиц

потока – с.е.п., 10^{-22} Вт · м⁻² · Гц⁻¹), 17 опасных ($10\ 000 < S \leq 100\ 000$ с.е.п.) и 4 экстремальных ($S > 100\ 000$ с.е.п.) солнечных радиовсплеска.

Один из таких радиовсплесков произошел 6 декабря 2006 г. В этот день приемное оборудование зафиксировало падение отношения сигнал–шум на 20 Дб, что привело к срывам сопровождения сигнала в приемнике. Результатом такого срыва может являться существенное ухудшение точности получаемых координат и даже, в особых случаях, полная невозможность предоставления координат пользователю. Во время данной вспышки на подсолнечной стороне на протяжении около 10 мин навигация с использованием GPS была невозможна на большой территории.

КАРТИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Безусловным преимуществом GPS/ГЛОНАСС-технологии для ионосферных исследований является возможность получить глобальные пространственные карты неоднородностей ионосферы. Одно из направлений, которым последние несколько лет занимается наша научная группа – разработка сервиса для предоставления таких пространственных карт для всех заинтересованных пользователей. Проект мониторинга и исследования ионосферы SIMuRG (System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS; <https://simurg.iszf.irk.ru/>) позволяет каждому применить данные GPS/ГЛОНАСС для своих исследова-

2019-06-25 06:39 по Всемирному времени
вариации ПЭС 2–10 мин

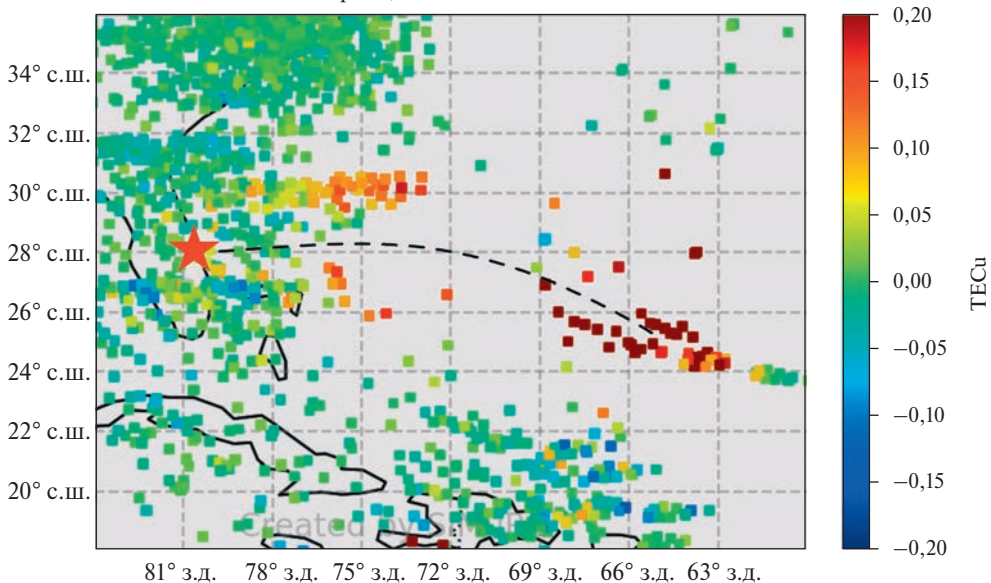


График вариаций ПЭС ионосферы во время запуска ракеты-носителя Falcon Heavy 25 июня 2019 г. (всего выведено на разные орбиты 24 спутника), вызвавший существенный рост электронной концентрации (красные точки). Место запуска – Космический центр им. Дж. Кеннеди (отмечено звездочкой). Пунктирная линия показывает примерную траекторию полета ракеты, построенную, исходя из наблюдаемых возмущений в ионосфере

дований. Ниже представлены примеры различных возмущений в ионосфере, которые могут быть исследованы на основе подобных карт.

Возмущения и волны от запусков ракет
GPS/ГЛОНАСС-исследования ионосферы в нашем институте начались фактически с изучения отклика ионосферы на запуски космических аппаратов. Было обнаружено, что при запуске ракет в полном электронном содержании возникает N-образное возмущение. Это N-образное возмущение образуется вследствие генерации ударной акустической волны при сверхзвуковом движении ракеты в атмосфере. Фактически, измеряя отклик ионосферы в разных регионах, можно отследить месторасположение источника зарегистрированного возмущения. Источник возмущений при запусках ракет был обнаружен на значительном удалении от места запуска (~500 км) и соотносился с местом входа ракеты в ионосферу.

Анализ данных плотных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС показал наличие не только ударного возмущения,

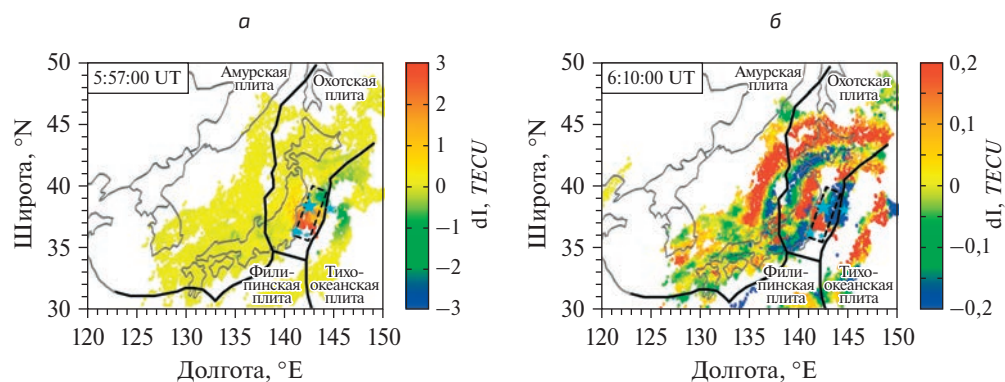
но и локального возмущения в ионосфере, связанного с выбросом ракетного топлива и изменения химического состава в ограниченной области ионосферы. Например, 25 июня 2019 г. изменен отклик ионосферы на запуск ракеты-носителя Falcon Heavy, произведенный компанией SpaceX. Запуск состоялся в 06:30 UT со стартовой площадки Космического центра им. Дж. Кеннеди. В 6:34 UT к юго-востоку от площадки возникло ионосферное возмущение, проявившееся в существенном росте электронной концентрации. Возмущение достигло максимума к 6:39 UT, через 9 мин после старта. Интересно, что регистрируя возмущения в ионосфере, возможно отследить примерную траекторию полета ракеты.

Волны от землетрясений

Первые исследования воздействия сейсмических процессов (землетрясений) на ионосферу также выявили наличие ударных акустических волн, аналогичным волнам, генерирующим при запуске ракет. Мощнейшие землетрясения позволили обнаружить весь спектр ионосферных возмущений, возник-

Графики вариаций ПЭС во время землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. в Японии:

а – в 5:57:00 UT, б – в 6:10:00 UT, в – в 6:46:30 UT. Черные жирные линии показывают области контакта литосферных плит. Пунктирный прямоугольник отмечает область максимальных подвижек земной коры. Эпицентры наиболее сильных толчков – голубые звездочки разного размера. По данным SIMuRG



кающих в ионосфере вследствие этих сейсмических событий. Одно из сильнейших землетрясений современности – Великое японское землетрясение Тохоку (Tohoku) – произошло в Японии 11 марта 2011 г. и имело магнитуду $M_w = 9,0$. Главному толчку землетрясения предшествовали несколько сильных форшоков ($M_w > 6,0$). После основного события была зарегистрирована сильная афтершоковая активность, включавшая 60 толчков с магнитудой $M_w > 6,0$ и три толчка с $M_w > 7,0$. Гряда Японских островов в результате землетрясения сместилась на восток относительно Тихоокеанской плиты, почти перпендикулярно линии контакта плит (черные жирные кривые).

В первые моменты землетрясения в ионосфере наблюдалось интенсивное возмущение, распространяющееся на юго-запад. Его скорость составила около 2–2,6 км/с. Следует отметить, что такие высокие скорости не характерны для внутренних процессов в самой атмосфере и ионосфере, зато достаточно хорошо соответствуют скорости поверхностной волны Релея, которая распространяется в земной коре во время землетрясения. Поверхностная волна на удалении от эпицентра землетрясения воздействует на атмосферу. Возмущение поднимается вверх и проявляется в ионосфере. Наибольшая

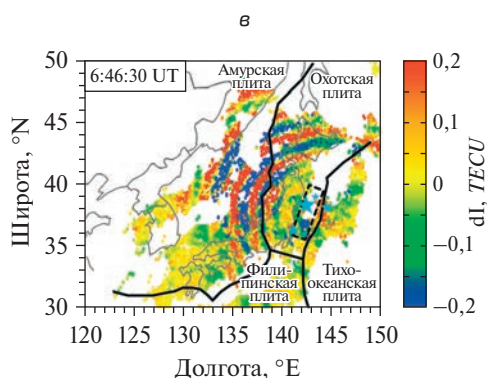
интенсивность возмущения наблюдалась в юго-западном направлении, где регистрировались максимальные подвижки земной коры.

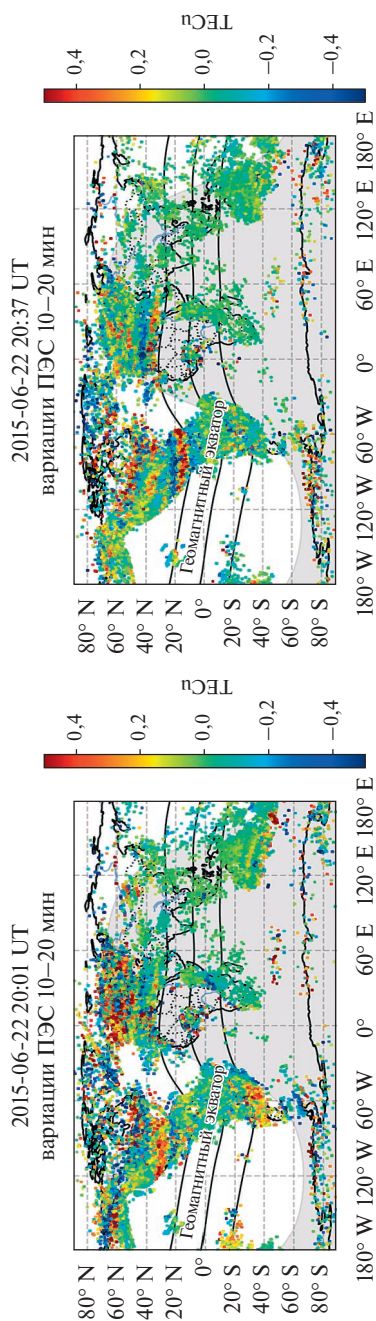
Помимо такого возмущения, связанного с воздействием сейсмических волн, быстро распространяющихся по поверхности Земли, в ионосфере наблюдались явно выраженные волновые возмущения, образующие расходящееся от источника кольцо. Это уже атмосферные волны, которые породило землетрясение в момент толчка. Эти волны по своей природе похожи на те, которые образуются при броске камня в спокойный водоем. В период времени 05:50–06:25 UT можно было наблюдать крупномасштабные волновые возмущения с длиной волны около 600 км и скоростью 700–1000 м/с, а после 06:17 UT – среднемасштабные возмущения с длиной волны около 200 км и скоростью 150–300 м/с.

Ряд работ указывает на возможность выявления ионосферного отклика на цунами, которые часто сопровождают подводные землетрясения. Такая информация в будущем может служить дополнительным источником для раннего предупреждения этого опасного явления.

Волны во время магнитных бурь

Магнитные бури являются одним из наиболее значимых факторов, влияющих на состояние ионосферы. Во время магнитных бурь происходит расширение аврорального овала в сторону более низких широт. Авроральным овалом называют область в высоких широтах, в которой благодаря конфигурации магнитного поля высокоэнергичные частицы солнечного ветра могут достигать атмосферы Земли. Вследствие чего в этой области наблюдаются полярные сияния. В распределениях ПЭС авроральный овал выглядит как зона нерегулярных возмущений, где





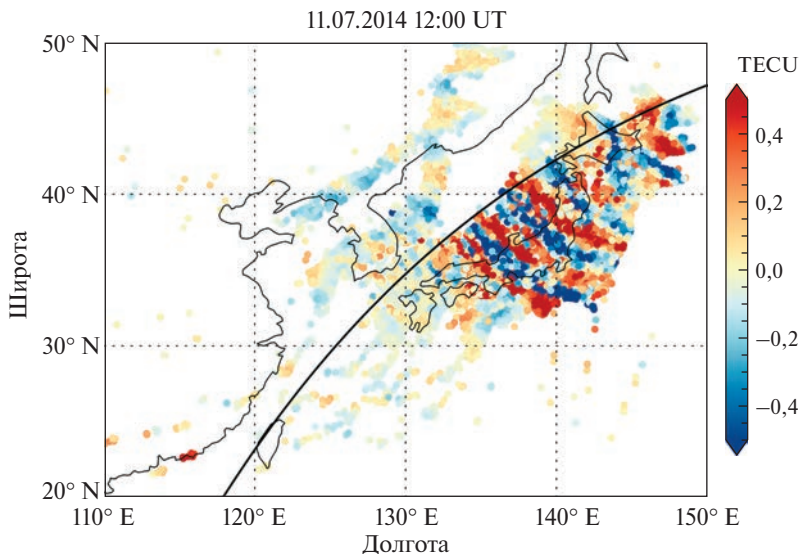
Графики вариаций ПЭС во время магнитной бури 22 июня 2015 г.: а – в 20:00 UT; б – в 21:00 UT. Хорошо видно, как в Европейско-Азиатском секторе волновые возмущения перемещаются в область средних широт. По данным S/MuRG

положительные (красные) вариации ПЭС быстро сменяют отрицательные (синие), не образуя какой-либо четкой пространственной структуры. Например, в период сильной магнитной бури, произошедшей 22 июня 2015 г., на Европейско-Азиатском секторе такие возмущения перемещаются в область средних широт. Двигаясь на средние широты, авроральный овал приводит к появлению здесь неоднородностей ионосферы, которые ухудшают работу технических радиосредств, использующих ионосферный канал.

В американском секторе во время этой бури в северном (и южном) полушарии в ионосфере возникла крупномасштабная волна, распространяющаяся в сторону экватора. Такие волны возникают, как правило, не очень часто и основным их источником является тот же авроральный овал. Интересно отметить, как волновой фронт выстраивается вдоль геомагнитной параллели.

Солнечный терминатор как источник волн

Границу освещенной и неосвещенной атмосферы называют солнечным терминатором. Солнечный терминатор также является источником ионосферных возмущений, поскольку на этой границе существует резкий скачок параметров атмосферы (температуры, давления, электронной концентрации), который к тому же движется. Измерения GPS/ГЛОНАСС позволили обнаружить, что при движении солнечного терминатора в ионосфере возникают волны. Например, среднемасштабные волновые возмущения с длиной волны порядка 100 км образуются при движении солнечного терминатора. Эти волны появляются в ионосфере регулярно день-от-дня. Интересно отметить, что такие возмущения могут возникать и раньше времени прохождения солнечного терминатора. Такое проис-



Реакция ионосферы на прохождение солнечного терминатора. Цветом точек показана интенсивность вариаций ПЭС. После прохождения солнечного терминатора в ионосфере отчетливо наблюдается волновая структура. Положение солнечного терминатора в ионосфере на высоте 200 км показано жирной черной линией. Рисунок получен по данным плотной сети приемных станций в Японии. По данным SIMuRG

ходит в том случае, когда в точке в другом полушарии, которая связана с точкой наблюдения по магнитному полю, солнечный терминатор проходит раньше по времени, чем в точке наблюдения. Тогда возмущение по магнитному полю передается из одного полушария в другое. В этом случае в полной мере проявляется взаимосвязь атмосферы, ионосферы и магнитосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы не ставили перед собой задачи показать абсолютно все явления в ионосфере, которые могут быть исследованы с помощью GPS/ГЛОНАСС-зондирования. Статья, скорее, является призывом более полно использовать такие данные для различного рода исследований. Следует отметить, что как в России, так и за рубежом – существует большое количество научных групп,

занимающихся изучением ионосферы на основе данных GPS/ГЛОНАСС (и других систем). Это, в свою очередь, указывает на эффективность такого инструмента.

Из интересных направлений развития хотелось бы отметить появившиеся в последние годы работы по использованию смартфонов для исследования ионосферы. Невозможно вообразить тот объем данных, который в будущем могут предоставить миллиарды пользователей, у которых стоит чип GPS/ГЛОНАСС.

В работе использовались результаты, полученные коллективом авторов в ИСЗФ СО РАН и ИКИР ДВО РАН, сформированным профессором Э.Л. Афраймовичем (12.03.1940–08.11.2009). Для обработки данных для настоящей статьи использовался проект SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru/>), создаваемый при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20005).