

УДК 537.877

НОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТООРИЕНТИРОВАННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОСИСТЕМ

© 2020 г. В. П. Сивоконь^{1, 2, *}

¹Институт космических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН),
п. Паратунка, Камчатский край, Россия

²Камчатский государственный технический университет,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

*e-mail: vsivokon@mail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2019 г.

После доработки 11.08.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Предложен метод исследования искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы и способ его практической реализации. Разработанный подход позволяет определить наиболее вероятные продольные размеры и расстояния, сопоставимые с длиной волны нагревного излучения, между неоднородностями вдоль и поперек магнитного поля Земли, а также скорость и направление их перемещения. При реализации метода используется технология программно определяемых радиосистем “Soft Defined Radio”, что позволяет дистанционно проводить необходимые измерения. Приводятся результаты наблюдений за экспериментами по формированию искусственных магнитоориентированных неоднородностей в обсерватории Аресибо, которые подтверждают возможность определения топологии магнитоориентированных неоднородностей ионосферы на основе предлагаемого метода.

DOI: 10.31857/S0016794020020157

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что магнитоориентированные неоднородности ионосферы влияют на эффективность функционирования радиолокационных систем [Booker, 1956; Сивоконь, 2017]. При проведении экспериментов по активному воздействию на ионосферу они играют важную роль в эффекте саморассеяния нагревной волны [Галушко и др., 2012]. При передаче информации на сверхдальние расстояния эти неоднородности в значительной степени определяют эффективность возбуждения ионосферного волновода [Кравцов и др., 1979]. Следовательно, актуальным является исследование их параметров. Для исследования свойств магнитоориентированных неоднородностей используются сложные системы, например SuperDARN [Berngardt et al., 2015] и пеленгаторы с линейной частотной модуляцией сигнала [Урядов и др., 2008, 2009]. Как правило, в таких исследованиях получают сведения о размерах области, занимаемой магнитоориентированными неоднородностями, и скорость, с которой эта область движется [Урядов и др., 2009; Kendall et al., 2010]. При этом параметры самих неоднородностей и их

структура мало изучены. Проведенные нами исследования [Сивоконь, 2016, 2017] показали возможность оценки направленных свойств рассеянного на магнитоориентированных неоднородностях ионосферы поля на основе приемов, применяющихся для оценки диаграмм направленности линейных излучателей. Сочетание этого подхода с возможностями технологии “Soft Defined Radio” (SDR) позволяет дистанционно проводить эксперименты по исследованию свойств магнитоориентированных неоднородностей в декаметровом диапазоне длин волн.

2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Магнитоориентированные неоднородности располагаются вдоль силовых линий магнитного поля Земли и имеют продольные размеры во много раз большие поперечных, что позволяет представить их в виде системы диполей, наклоненных к поверхности Земли под углом, равным магнитному наклону [Сивоконь, 2016].

В этом случае, результирующее пространственное распределение рассеянного поля будет

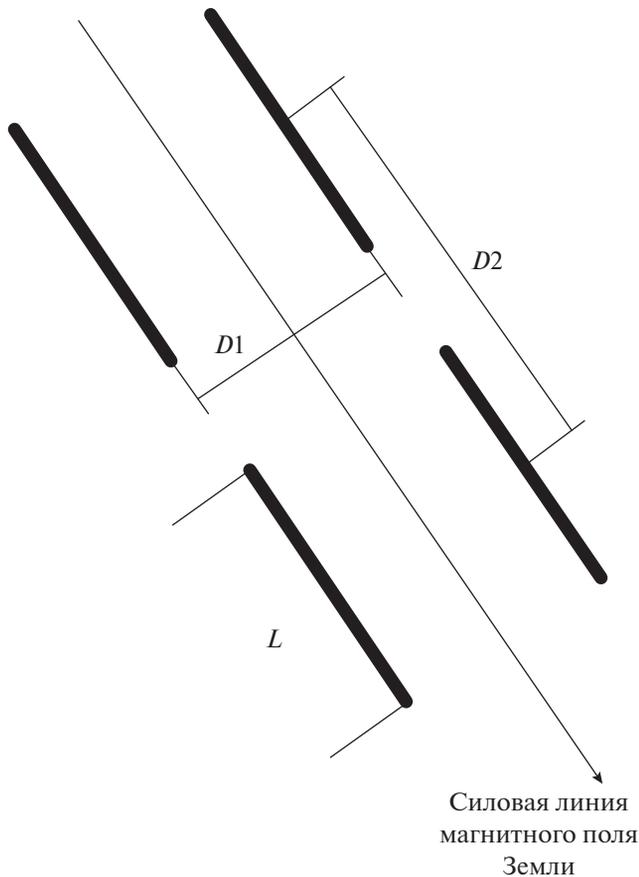


Рис. 1. Модель топологии магнитоориентированных неоднородностей.

определяться, рис. 1, продольными размерами магнитоориентированных неоднородностей L и расстояниями между ними поперек $D1$ и вдоль $D2$ линий магнитного поля Земли. Рассмотрим каждую из этих составляющих.

Диаграмма направленности диполя в горизонтальной плоскости зависит от соотношения его длины к длине электромагнитной волны, излучаемой им, и угла наблюдения

$$F(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin(\varphi)) - \cos(kl)}{\cos(\varphi)},$$

где φ – угол, отсчитываемый от перпендикуляра к оси диполя; l – длина диполя; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – длина волны.

Как правило, при оценке пространственного распределения излучаемого поля используют зависимость от угла наблюдения. Однако, если взять два направления, например $\varphi_1 = 10^\circ$ и $\varphi_2 = 80^\circ$, то можно получить отношение интенсивностей, характерное для определенного отношения длины излучателя к длине волны. Поскольку возможно несколько близких по вели-

чине соотношений, то путем моделирования установили, что при шаге изменения длины излучателя к длине волны, равном $\Delta l/\lambda = 1.7 \times 10^{-5}$, и точности совпадения отношений интенсивностей до 10^{-4} , снимается неоднозначность определения длины неоднородности. Следовательно, измерив интенсивности излучения для двух направлений и взяв их отношение, можно определить параметры неоднородности.

Суммарное поле, создаваемое парой неоднородностей поперек силовой линии магнитного поля Земли, можно представить, как результат сложения их полей

$$E_p = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(kD_1 - \Phi)},$$

где E_1 и E_2 – поля, создаваемые первым и вторым излучателями; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; Φ – разность фаз между полями; D_1 – расстояние между ними. Если предположить, что неоднородности облучаются плоской волной, а при использовании направленных антенн в активных экспериментах это близко к реальности, то в пределах пары неоднородностей $E_1 = E_2$, а $\Phi = 0$. Тогда при регистрации излучения по двум направлениям определяющие значения имеют расстояния между неоднородностями и углы наблюдения, а множитель системы из двух неоднородностей можно записать, как

$$F_n(\varphi) = \sqrt{1 + \cos(kD_1 \cos(\varphi))}.$$

Следовательно, проводя измерения в двух пунктах, можно определить вероятное расстояние между неоднородностями поперек силовых линий магнитного поля Земли.

Результирующее поле, формируемое двумя неоднородностями, расположенными вдоль силовой линии, зависит от расстояния между ними и фазовым сдвигом между полями. В общем случае, множитель системы можно записать, как [Чернышов, 1978]

$$F_b(\varphi) = \frac{\sin(0.5n(kD_2 \sin(\varphi) - \Phi))}{\sin(0.5(kD_2 \sin(\varphi) - \Phi))},$$

где Φ – разность фаз между полями; D_2 – расстояние между ними. Для $n = 2$ и $\Phi = 0$

$$F_b(\varphi) = \frac{\sin((kD_2 \sin(\varphi)))}{\sin(0.5(kD_2 \sin(\varphi)))}.$$

Тогда из результатов наблюдений в двух пунктах можно получить вероятное расстояние между неоднородностями вдоль силовой линии магнитного поля Земли.

Для реализации этого способа изначально предполагалось, что оба пункта наблюдения должны находиться в пределах прямой видимо-

сти области рассеяния, поскольку в этом случае исключается неоднозначность определения коэффициента ослабления в ионосфере. В идеальном случае, пункты наблюдений должны находиться на одинаковом расстоянии от области рассеяния. Реализовать такое требование затруднительно, поэтому для компенсации разности ослаблений поля, обусловленной отличными расстояниями, можно воспользоваться известной формулой зависимости напряженности поля от удаления

$$E = \frac{173\sqrt{PD}}{r},$$

где P – мощность передатчика; D – коэффициент направленного действия передающей антенны; r – расстояние. Поскольку величины P и D – параметры области рассеяния – относятся в равной степени к обоим пунктам наблюдения, то относительное изменение E_1/E_2 , как результата разности удалений, будет определяться только отношением расстояний r_1/r_2 . Используя поправочный коэффициент $\Delta = r_1/r_2$, можно учесть эту особенность в постановке эксперимента.

Осуществление такого подхода, до недавнего времени, было затруднено необходимостью дистанционного управления двумя приемными устройствами, расположенными на большом удалении от места нахождения экспериментаторов, например, Институт космических исследований и распространения радиоволн на Камчатке и нагревный стенд Аресибо в Пуэрто-Рико. С появлением технологии “Soft Defined Radio” (SDR) и широким ее распространением в мире эта задача существенно упростилась.

Приемники SDR имеют принципиальное отличие от обычных радиоприемников, как в части реализации, так и доступа к ним. В этой технологии сигнал, поступающий из антенны, подвергается дискретизации, и дальнейшая его обработка происходит в цифровом виде. При меньшей чувствительности SDR-приемников, технология позволяет установить одинаковый коэффициент усиления приемного тракта нескольких приемников, находящихся в разных пунктах. Если взять две однотипные приемные антенны и два однотипных SDR-приемника, то их можно использовать для наблюдений без предварительной калибровки, в случае супергетеродинных приемников такая операция обязательна. Безусловным достоинством технологии является дистанционный доступ и управление приемником, запись сигнала в формате “wave” с последующим его скачиванием.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

В начале проводились наблюдения за электромагнитным излучением нагревного стенда EISCAT с использованием сети SDR-приемников университета Twente [<http://websdr.ewi.utwente.nl:8901/>]. Исходя из выраженных направленных свойств нагревного стенда EISCAT, необходимости выработки навыков одновременной работы с несколькими приемниками SDR, задача наблюдений сводилась только к обнаружению и корректной записи рассеянной нагревной волны не только в конус, ориентированный вдоль силовой линии магнитного поля Земли, но и в направлениях существенно отличающихся от него.

В октябре–ноябре 2017 г. в Тромсё проводились следующие эксперименты по активному воздействию на ионосферу.

Исследование стратификации электронной концентрации на распространение L -моды через F -слой ионосферы.

Наблюдение плазменных неоднородностей, созданных нагревом EISCAT, с использованием системы GNSS + SAR (Global Navigation Satellite System + Search And Rescue).

Исследование гиромангнитных эффектов при излучении необыкновенной волны и резонансного поглощения при генерации обыкновенной волны.

Нагревные эксперименты с целью генерации экстремально низких и сверхнизких частот с использованием амплитудной модуляции и технологии “Beat wave”.

Каждому из этих направлений исследований присущи определенные особенности, в том числе связанные с выбором частоты. В сети SDR-приемников университета Twente полосы доступных частот на различных приемниках, как правило, не совпадают. Вследствие этого одновременная регистрация излучения EISCAT на нескольких приемниках была не всегда возможна, рис. 2.

Тем не менее, 6 ноября в 13:15–13:45 UT нагревное излучение на частоте 5423 кГц наблюдалось в Ulvila, Shlezwig, Twente, Bedford и Череповце. В это время проводились эксперименты по программе CN4: исследования гиромангнитных эффектов при излучении необыкновенной волны и резонансного поглощения при генерации обыкновенной волны, в ходе которых генерация искусственных магнитоориентированных неоднородностей весьма вероятна. При этом азимуты на пункты, в которых регистрировалась нагревная волна, распределились следующим образом:

1. Bedford – 217°.
2. Twente – 203°.
3. Shlezwig – 200°.

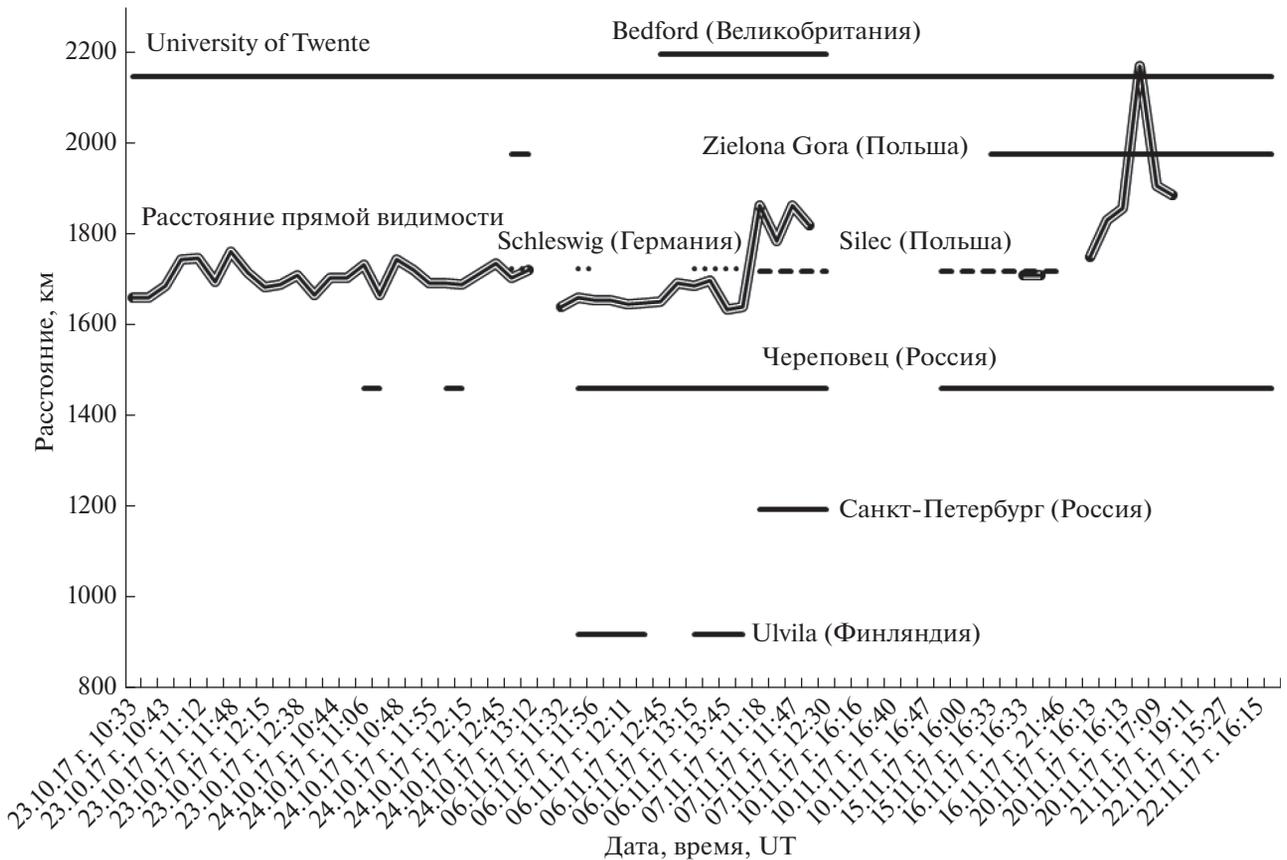


Рис. 2. Распределение наблюдений нагревного излучения в разных пунктах.

4. Ulvila – 167°.

5. Череповец – 131.6°.

Магнитное склонение в Тромсё составляет 8.74°. Тогда отклонение в горизонтальной плоскости от направления в магнитный зенит для Bedford составит $217 - 8.74 - 180 = +28.64^\circ$, а для Череповца $131.6 - 8.74 - 180 = -57.14^\circ$. Такое большое отклонение от оси конуса рассеяния вряд ли может быть объяснено ракурсным рассеянием, в то же время рассеянием на магнитоориентированных неоднородностях, показанным нами ранее [Сивоконь, 2017], вполне объяснимо. Следовательно, при проведении активных экспериментов в ионосфере возможно рассеяние нагревной волны в значительном телесном угле, а не только в конус рассеяния.

В 2018 г. на сайте Аресибо [http://www.naic.edu/vscience/schedule/scedfra2.htm] появилась информация о планируемых экспериментах, в том числе нагревных. Наибольший интерес, применительно к нашему направлению исследований, представляет программа H3286: “ISR and Satellite Observation of Artificial Field Aligned Plasma Density Irregularities Generated by the Arecibo HF Heating Facility”. Поскольку в районе Аресибо SDR-при-

емников сети Twente подыскать не удалось, использовали возможности другой сети KiwiSDR [http://www.ve3sun.com/KiwiSDR/]. Для наблюдения наиболее подходящими оказались приемники, расположенные в Santo Domingo (Доминиканская республика) и Bonaire (Нидерланды). Расстояние от Arecibo до Santo Domingo составляет 340 км, азимут 271°. До Bonaire расстояние составляет 724 км, азимут равен 192°. Для оценки возможности прихода нагревной волны в эти пункты путем преломления в ионосфере провели моделирование с использованием программы VOACAP. Из технических данных нагревного стенда Аресибо [http://www.AreciboObservatory.org/hf-policies.pdf] известно, что ширина диаграммы направленности его антенны по уровню половинной мощности составляет 13°, что составляет 6.5° от зенита или 83.5° от горизонта. Моделирование на VOACAP позволило определить необходимые для прихода нагревного излучения путем преломления в ионосфере углы излучения в вертикальной плоскости, которые составили: излучение нагревного стенда происходит в конус, ограниченный углом 83.5°, для Santo Domingo этот угол должен составлять 44° и 21° для Bonaire. Очевидно, что при таких характеристиках нагрев-

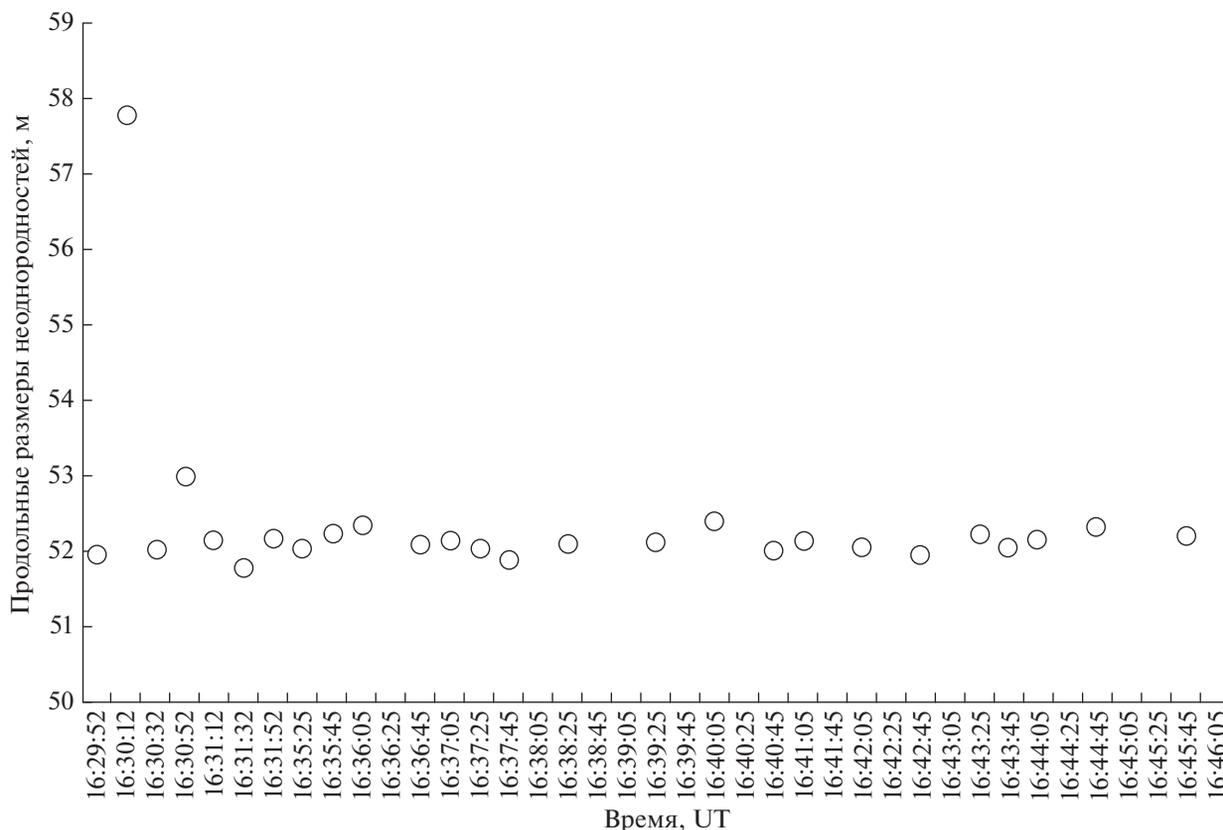


Рис. 3. Распределение продольных размеров неоднородностей.

ного стенда и параметрах трасс прием нагревной волны, преломленной в ионосфере, маловероятен. Тем не менее, для определения истинных углов на момент проведения экспериментов использовались ионограммы станции, расположенной в Ramey (Пуэрто-Рико), которые показали незначительное отклонение от прогноза: для Santo Domingo 33° и 17° для Bonaire.

9 ноября в период с 16 до 17 ч мирового времени проводились наблюдения за активным воздействием на ионосферу в Аресибо с использованием SDR-приемников в Santo Domingo и Bonaire. Нагрев производился на частоте 5095 кГц по схеме: 10 с нагрев, 10 с пауза. Запись проводилась одновременно двумя приемниками блоками по 3 мин. Длительность блока сделали небольшой для обеспечения гарантированного доступа к приемникам, поскольку они имеют ограниченное количество доступных слотов, и при большом времени записи возрастает вероятность отключения пользователя, как неостребованного. Из записей в формате "wave" с использованием анализатора спектра получаем информацию об амплитуде и частоте нагревной волны. При этом размер быстрого преобразования Фурье (FFT size) выбирается максимально возможным, что позволяет увеличить спектральное разрешение. Добиться

одновременного начала записей невозможно, поэтому за точку отсчета брали начало нагревного цикла в записях. Поскольку для точного определения соотношения амплитуд необходима синхронизация по времени, а начала записей не синхронизированы, то при определении линейных параметров неоднородностей за анализируемый период времени принят интервал нагрева, т.е. 10 с.

В качестве примера приведем результаты обработки записей с 16:30 до 16:45 UT 9 ноября 2018 г.

Геофизическая обстановка в период измерений.

Магнитное поле Земли слабо возмущенное. Планетарный магнитный индекс $Kp = +3$; $D_{st} = -21$ нТ [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realttime/201811/index.html].

Интенсивность солнечного излучения на длине волны 10.7 см – 69.02 [http://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-5-en.php].

Ионосферные данные: $f_{min} = 5.25$ МГц; $f_oF2 = 7.1$ МГц $h_{mF2} = 229.5$ км [http://lgdc.uml.edu/common/DIDBYearListForStation?ursiCode=PRJ18].

Из приведенных данных следует, что особых возмущений в геофизической обстановке не отмечается, за исключением высокого значения f_{min} .

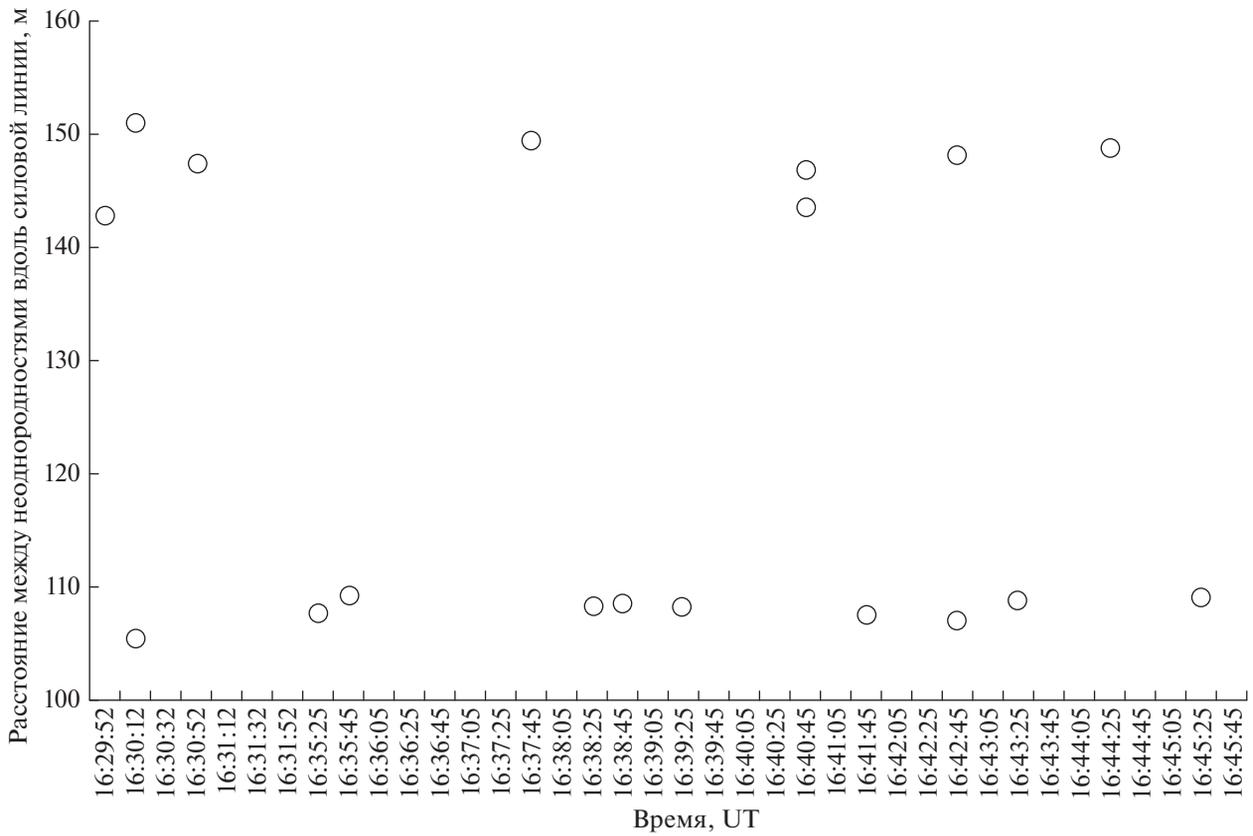


Рис. 4. Вероятное расстояние между неоднородностями вдоль силовой линии магнитного поля Земли.

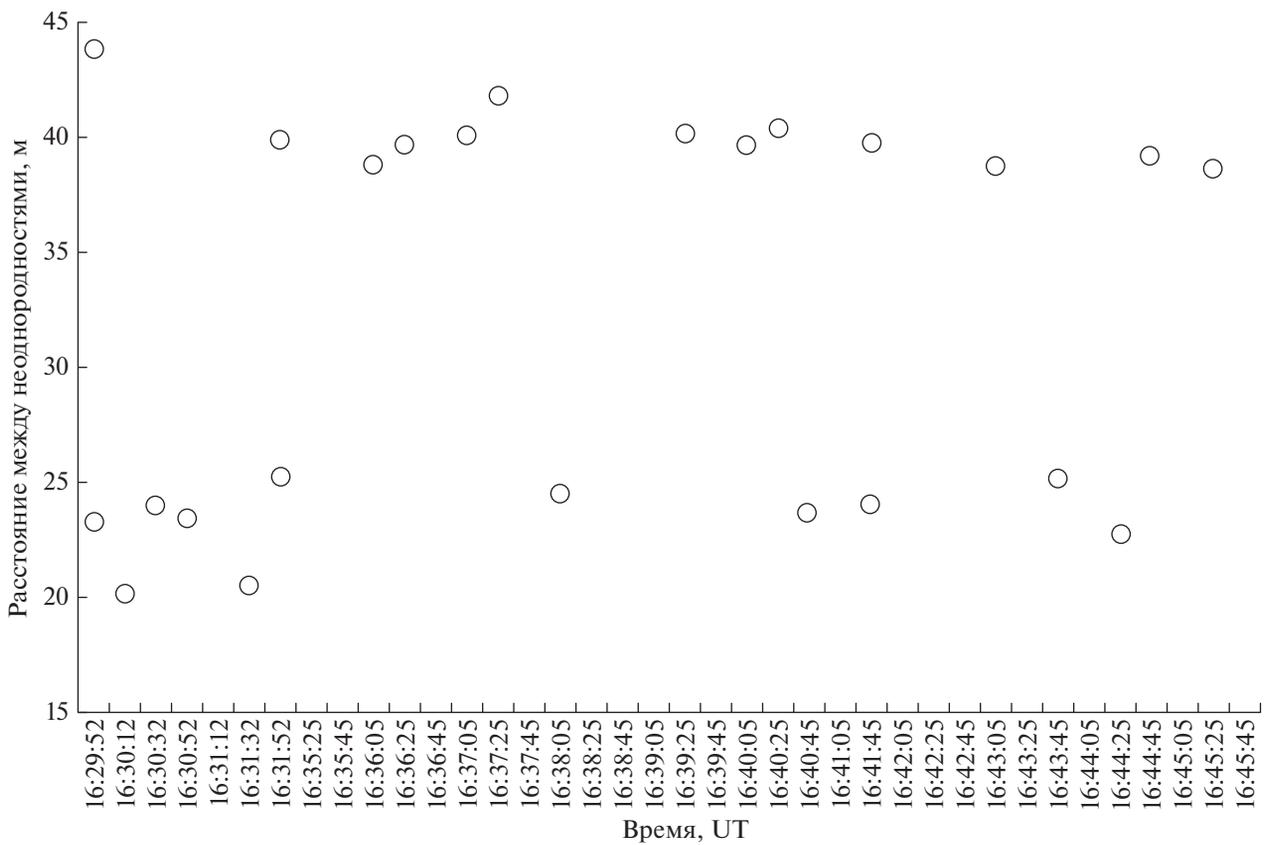


Рис. 5. Вероятное расстояние между неоднородностями поперек силовой линии магнитного поля Земли.

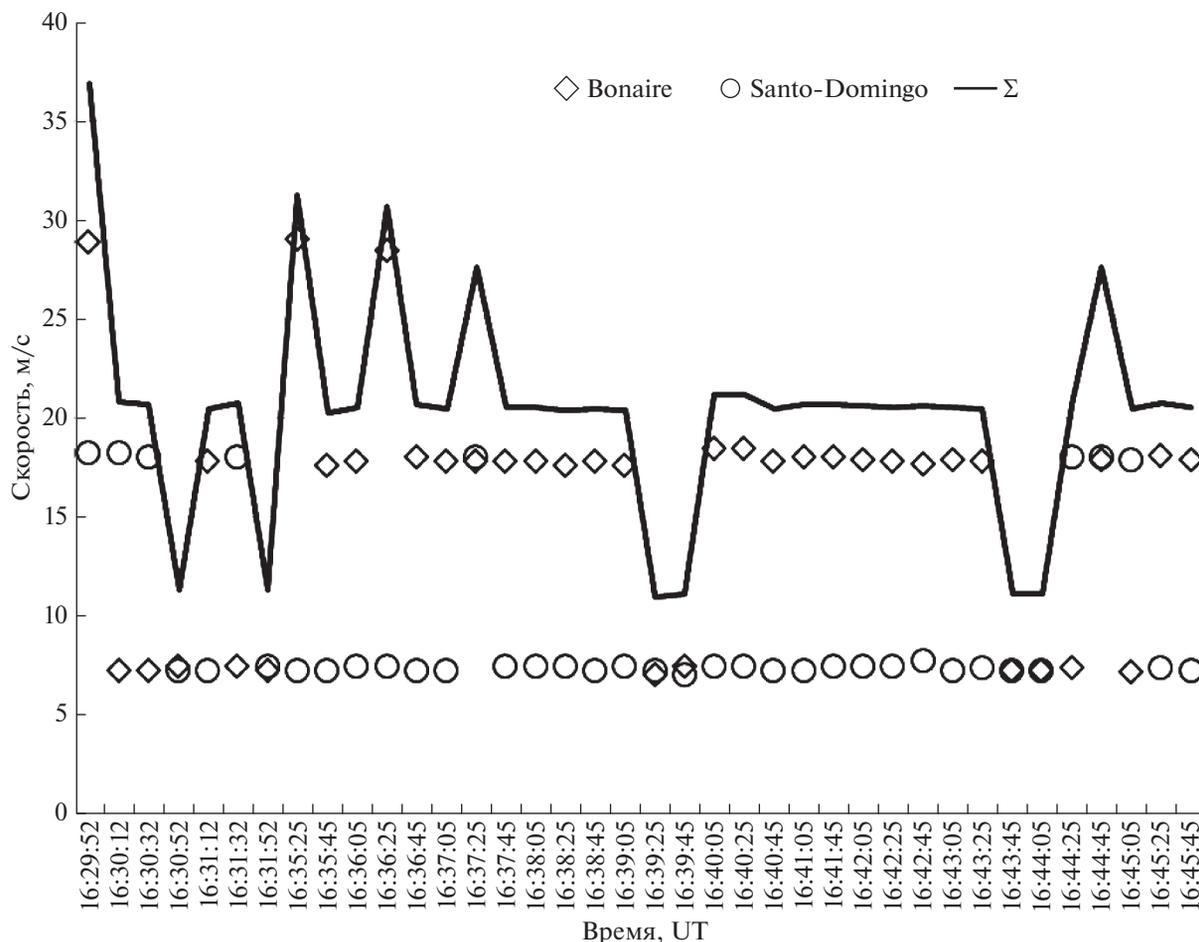


Рис. 6. Скорости перемещения магнитоориентированных неоднородностей.

Обработав по описанному выше методу данные, получили следующее.

1. Распределение продольных размеров неоднородностей, рис. 3.
2. Возможные расстояния между неоднородностями вдоль силовой линии, рис. 4.
3. Вероятные расстояния между неоднородностями поперек силовой линии, рис. 5.
4. Скорости перемещения неоднородностей.

Расчет скоростей производился по спектрограммам также с усреднением в 10 с. Результаты определения скоростных характеристик показаны на рис. 6. Поскольку известен угол между векторами скоростей, можно определить результирующую скорость и направление перемещения неоднородностей. В указанный период времени неоднородности перемещались в юго-западном направлении. В работе [Урядов, 2009] приводятся результаты исследования параметров искусственных магнитоориентированных неоднородностей, сформированных при экспериментах на нагревном стенде “Сура”. Полученные нами скорости перемещения неоднородностей практиче-

ски идентичны приводимым в названной публикации.

Возможности метода существенно возрастают при наблюдениях на нескольких частотах и в нескольких пунктах. Стремительное увеличение числа приемников SDR позволяет организовать наблюдения в трех и более пунктах. Для наблюдений на нескольких частотах можно использовать излучение пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала [Урядов, 2009] при соответствующем взаимном расположении области нагрева, пеленгатора и приемников SDR.

4. ВЫВОДЫ

1. Разработан метод определения параметров искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы на основе анализа параметров саморассеянной волны.

2. Показана возможность его практической реализации с использованием технологии SDR, которая позволяет осуществить удаленную диагно-

стику магнитоориентированных неоднородностей ионосферы.

3. Полученные скорости неоднородностей практически совпадают с приводимыми в работах [Урядов и др., 2009; Hysell et al., 2018].

4. Продольные размеры наблюдавшихся нами магнитоориентированных неоднородностей в целом совпадают с размерами искусственных магнитоориентированных неоднородностей, полученных в экспериментах, проводившихся на обс. Аресибо [Kelley et al., 1995].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галушко В.Г., Безродный В.Г., Колосков А.В., Зализовский А.В. и др. О возможном механизме “эффекта саморассеяния” мощных ВЧ сигналов в ионосфере // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 17. № 2. С. 112–124. 2012.
- Кравцов Ю.А., Тинин М.В., Черкашин Ю.Н. О возможных механизмах возбуждения ионосферных волновых каналов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 19. № 5. С. 769–787. 1979.
- Сивоконь В.П. Магнитоориентированные неоднородности – ионосферная система переизлучателей // Изв. вузов. Физика. Т. 59. № 12-3. С. 56–60. 2016.
- Сивоконь В.П. Обратное рассеяние декаметровых волн на магнитоориентированных неоднородностях ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 3. С. 343–352. 2017.
- Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. Зондирование искусственно возмущенной области ионосферы с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала // Изв. вузов. Радиофизика. Т. LI. № 4. С. 267–277. 2009.
- Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А. и др. О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов // Изв. вузов. Радиофизика. Т. LI. № 12. С. 1011–1025. 2008.
- Чернышов В.П. Антенно-фидерные устройства радиосвязи и радиовещания. М.: Связь, 288 с. 1978.
- Berggardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: first results // Earth Planets Space. V. 67(143). 2015. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0302-3>
- Booker H.G. A theory of scattering by nonisotropic irregularities with application to radar reflections from aurora // J. Atmos. Terr. Phys. V. 8. P. 204–221. 1956.
- Hysell D., Larsen M., Fritts D., Laughman B., Sulzer M. Major upwelling and overturning in the mid-latitude F region ionosphere // NATURE COMMUNICATIONS. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05809-x>. 2018. www.nature.com/naturecommunications
- Kelley M.C., Arce T.L., Salaway J. et al. Density depletions at the 10-m scale induced by the Arecibo heater // J. Geophys. Res. V. 100. P. 17367–17376. 1995.
- Kendall E., Marshall R., Parris R.T. et al. Decameter structure in heater-induced airglow at the High frequency Active Auroral Research Program facility // J. Geophys. Res. V. 115. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA015042>