

ФАКТОР КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ В РЕАЛИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-31-38

Manuscript received 17 November 2024;
Accepted 25 December 2024

Сивоконь Владимир Павлович,
 Институт космических исследований и
 распространения радиоволн ДВО РАН,
 п. Паратунка, Россия;
 Камчатский государственный технический
 университет, г. Петропавловск-Камчатский, Россия,
vsivokon@mail.ru

Работа выполнена за счет Государственного
 задания ИКИР ДВО РАН
 (рег. № темы 124012300245-2)

Ключевые слова: модификация ионосферы,
 искусственные магнитоориентированные
 неоднородности, космическая пыль

Исследования по модификации ионосферы с использованием нагревных стенов включают в себя результаты, которые оказались существенно ниже ожидаемых. Например, задача формирования искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы на основе возбуждения ионосферного волновода, не решена в полной мере. Одной из причин такого расхождения, возможно, является наличие космической пыли в области воздействия на ионосферу. Для проверки этой гипотезы разработан новый метод исследования влияния космической пыли на эксперименты по активному воздействию на ионосферу, в котором использованы результаты исследования, выполненные сторонними организациями на нагревном стенде EISCAT. Нами используется метод многопозиционной диагностики магнитоориентированных неоднородностей на основе технологии SDR (Software Defined Radio) и естественный источник космической пыли - метеорный поток Геминиды. В результате экспериментально показано, что наличие в области активного воздействия на ионосферу космической пыли приводит к изменению характеристик искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы и, следовательно, параметров транс-континентальных ионосферных каналов связи.

Информация об авторе:

Сивоконь Владимир Павлович, главный научный сотрудник лаборатории "Электромагнитных излучений" Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, п. Паратунка, Россия;
 профессор кафедры "Энергетические установки и электрооборудование судов" Камчатского государственного технического университета,
 доктор технических наук, доцент, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Для цитирования:

Сивоконь В.П. Фактор космической пыли в реализации глобальных телекоммуникационных систем декаметрового диапазона // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 31-38.

For citation:

V. P. Sivokon, "The cosmic dust factor in the Implementation of global decameter range telecommunication systems," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.1 pp. 31-38. (in Russian)

I. Введение

Одним из направлений исследований активного воздействия на ионосферу является формирование искусственной ионизации и, как частный случай, создание магнитоориентированных неоднородностей электронной концентрации. Подобные неоднородности можно использовать для решения ряда прикладных задач, в том числе для закачки энергии в межслоевой ионосферный волновод, что позволяет реализовать трансконтинентальный канал передачи данных. Однако, как показывают эксперименты [1, 2] и их анализ [3], параметры искусственных магнитоориентированных неоднородностей не в полной мере отвечают ожиданиям экспериментаторов. Одной из причин такого положения дел, возможно, является наличие пыли в области активного воздействия на ионосферу. Исследованию пылевой плазмы уделяется большое внимание [4], что связано с новыми физическими эффектами [5] и её необыкновенными свойствами [6].

Имеются публикации, в которых рассматриваются ионосферные аспекты пылевой плазмы [7, 8]. Эксперименты по изучению влияния пыли на формирование полярного мезосферного летнего эха (PMSE) с использованием нагревного стенда EISCAT описаны в работах [9, 10]. Так в работе [9] предлагается методика исследования пыли в области формирования PMSE. Публикация [10] развивает предложенный в работе [9] метод в условиях низкой солнечной активности. Имеются теоретические работы [11-13], в которых показана возможность модуляционного возбуждения неоднородностей концентрации электронов и ионов в ионосфере. Например, в работе [12] описывается механизм формирования неоднородностей электронной и ионной концентраций в запыленной ионосфере в результате развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн накачки, с участием пылевых звуковых возмущений.

В рамках предложенного метода в качестве примера определены возможные масштабы неоднородностей электронной концентрации в запыленной ионосфере, формирующиеся в результате развития модуляционной неустойчивости в случае монохроматических электромагнитных волн от нагревного стенда HAARP для положительно заряженных пылевых частиц. В развитие публикации [12] в работе [13] акцентируется внимание на диапазоне высот 100-120 км, на которых вероятнее всего будет наблюдаться модуляционное возбуждение неоднородностей ионосферы над нагревным стендом HAARP. Экспериментальных исследований, направленных на оценку влияния пыли на результат активного воздействия на ионосферу с использованием нагревных стендов, выявить не удалось.

Вместе с тем, в публикации [14] показана роль пыли в формировании вихревых структур, которые способствуют усилению турбулентных процессов в плазме, что может сказаться на эффективности функционирования радиотехнических систем. Например, для передачи информации на большие расстояния используется ионосферный волновод. Существует несколько способов его возбуждения [15], в том числе путем формирования искусственных магнитоориентированных неоднородностей [1, 16-18]. В публикации [2] обобщаются результаты экспериментов по реализации нового метода создания глобальных радиолиний с использованием различных нагревных стендов EISCAT (Норвегия), HAARP

(Аляска) и Аресибо (Пуэрто-Рико). Поскольку эти исследования проводились на протяженных трассах не представляется возможным оценить степень влияния параметров искусственных неоднородностей на свойства канала связи. В рукописи [3] показано, что на индекс мерцаний S_4 ионосферного телекоммуникационного канала влияют свойства искусственных магнитоориентированных неоднородностей, скорости их перемещения, а также фоновые неоднородности электронной концентрации. Наличие пыли может повлиять на формирование искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы, что скажется на свойствах трансконтинентальной радиолинии. Следовательно, задача оценки фактора пыли в экспериментах по активному воздействию на ионосферу является актуальной.

II. Обоснование метода

Для решения поставленной задачи следует рассмотреть существующие способы исследования свойств космической пыли и возможность их использования в нашем случае. В работах [8-10] приводятся результаты исследований пыли проводившихся на высотах 70-90 км (слои D-E), в то время как наши исследования предполагается проводить на высотах слоев F1-F2. Для наблюдений используются УКВ радары, применение которых стало возможным вследствие образования метеоритными потоками ионизированных следов, что неосуществимо в слое F. Непосредственные исследования космической пыли проводятся с использованием датчиков, установленных на высотных геодезических ракетах и искусственных спутниках Земли [19]. Такой подход требует существенных материальных ресурсов, которыми мы не располагаем. Кроме того, большие мощности нагревных стендов формируют в области активного воздействия на ионосферу интенсивные электромагнитные поля, в которых функционирование датчиков вряд ли возможно.

Известно, что в зависимости от размеров частиц пыли её поведение в плазме существенно отличается [20]. Так в случае очень малых частиц меньше 10^{-6} см, она является частью плазмы. Если пыль при этом движется, то это приводит к дополнительному импульсу плазмы, и, предположим, искусственных неоднородностей ионосферы. Источником такой движущейся пыли могут быть метеорные потоки. Из публикаций по метеорному потоку Геминиды известно, что большую его часть составляют малые частицы [21]. Кроме того, в работе [22] показана возможность дифференциации наблюдений по размерам метеоритов, что позволяет компенсировать ошибку наблюдений в случае попадания в область активного воздействия крупных объектов, входящих в состав метеорного потока.

В предлагаемом методе оценки фактора космической пыли используется одно из свойств метеорного потока, а именно вариационного угла наблюдения обусловленное вращением Земли. Для получения необходимой информации используется способ многопозиционной регистрации рассеянного нагревного излучения [23], в котором используется технология SDR. 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. Безусловным достоинством технологии является дистанционный доступ и управление приемником, запись сигнала в формате “wave” с последующим его скачиванием. Из этих записей с использованием анализатора спектра получаем информацию об амплитуде и частоте рассеянной нагревной волны. Для повышения стабильности частоты приемника используется режим USB – однополосная модуляция верхней боковой полосы. Для проверки стабильности частоты и отсутствия нелинейности приемников используются сигналы передатчика точного времени RWM, расположенного в Москве.

Следовательно, мы можем выбрать пару пунктов наблюдения, для которых направление движения метеорного потока будет в одном случае квазипродольным, а в другом квазипоперечным. Тогда, эффект Доплера, обусловленный наличием движущейся пыли в области активного воздействия на ионосферу, будет постоянно наблюдаться в первом случае, и исчезать при поперечном движении метеорного потока во втором случае.

Как и в любом ионосферном эксперименте существенна роль геофизической обстановки. Поскольку перед нами стоит задача оценить влияние космической пыли на искусственные неоднородности ионосферы, наличие естественных неоднородностей должно быть минимальным, что возможно при спокойном магнитном поле Земли [24].

Определенное значение имеет и величина плазменной частоты. При активном воздействии на ионосферу, как правило, используют или гибридную частоту

$$f_{\text{гир}} = \sqrt{f_p^2 + f_g^2}$$

или гармонику гиромангнитной частоты.

$$f_{\text{гарм}} = n f_g$$

где f_p – плазменная частота, f_g – гиромангнитная частота, n – номер гармоники гиромангнитной частоты. В случае, когда плазменная частота штатным ионизондом нагревного стенда не определяется, можно сделать вывод об однозначном использовании в эксперименте гармоники гиромангнитной частоты. Исходя из зависимости гиромангнитной частоты от величины индукции магнитного поля Земли можно определить высоту наибольшей интенсивности воздействия. Кроме того, в случае низкой электронной концентрации повышается вероятность наличия в зоне воздействия именно искусственных неоднородностей электронной концентрации.

Таким образом, для успешной реализации предлагаемого метода необходимо проведение нагревных экспериментов в момент прохождения Земли через метеорный поток в условиях спокойного магнитного поля Земли и минимуме электронной концентрации ионосферы в месте расположения нагревного стенда.

III. Апробация метода

В ноябре 2021 года на сайте EISCAT [25] появилась информация о том, что 14 декабря 2021 года состоится эксперимент «RadardetectionofmeteorsfromtheGeminidmeteorshoweralongwithartificialheating». В описании заявки на эксперимент указывалось, что в нём будет использоваться УКВ-радар и нагревной стенд EISCAT для наблюдения за метеоритами из метеорного потока Геминиды. Сообщалось, что эксперимент планируется провести 14 декабря с 00 до 06 UT с частотой нагревной волны 5423 кГц. Нагрев будет производиться по схеме: 2 минуты нагрев - 2 минуты пауза.

Экспериментаторы предполагали, что такое воздействие должно повысить эффективность УКВ радаров на высотах 90-100 км. Используя модель магнитного поля Земли IGRF-13 университета Киото [26] можно показать, что частота 5423 кГц является четвертой гармоникой гиромангнитной частоты для высоты 241 км. Этот номинал частоты использовался ранее при проведении экспериментов на нагревном стенде EISCAT [27] и позиционировался именно как четвертая гармоника гиромангнитной частоты. В работе, в частности, приводится высотное-временное распределение электронной концентрации и температуры электронов, максимумы которых приходятся на высоты 220-250 км, что хорошо коррелирует с высотой определённой нами с использованием модели IGRF-13.

Можно ожидать, что в случае, когда плазменная частота во время проведения эксперимента будет мала, либо вовсе не будет определяться, вариант реализации гибридной частоты исключается. Это обстоятельство свидетельствует о применении четвертой гармоники гиромангнитной частоты, что в свою очередь позволяет достаточно точно локализовать область максимального проявления активного воздействия на ионосферу на высоте около 240 км. Тщательный подход к определению высоты воздействия необходим по следующей причине. Для оценки параметров искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы нами используется метод, основанный на регистрации резонансного, а не ракурсного рассеяния нагревной волны. Следовательно, при выборе пунктов наблюдения расстояние до них должно быть выбрано с расчётом их нахождения в пунктах, где регистрируется резонансное рассеяние.

Наличие искусственных магнитоориентированных неоднородностей подтверждается работой [28], в которой описывается серия экспериментов, проводившихся на нагревном стенде EISCAT, в том числе, на наблюдаемой нами частоте 5423 кГц. В другой публикации [29] показано, что при использовании частоты нагревной волны, значительно превышающей критическую частоту слоя F2, меняется степень проявления эффектов присущих подобным экспериментам, но не их характер.

С момента получения информации о конкретном метеорном потоке стала актуальной задача выбора пунктов регистрации рассеянного нагревного излучения. Данные о траектории движения метеорного потока Геминиды были получены из Московского планетария, что позволило перейти к выбору пунктов наблюдения. В используемом методе регистрации рассеянного нагревного излучения [23] используются SDR приемники сети Kiwi [30].

При достаточной насыщенности ими европейской части континента, только часть из них пригодна для решения поставленной задачи, поскольку они должны находиться в пределах прямой видимости области воздействия на ионосферу (Тромсе) и обладать высокой стабильностью частоты.

Для реализации нашего подхода одна трасса должна быть квазипродольной, а вторая квазипоперечной относительно

движения метеорного потока Геминиды. Имеется ещё одна особенность использования таких частных приёмников: количество слотов доступа и на какое время они доступны.

Из имеющихся на момент проведения эксперимента в сети приёмников наиболее пригодными оказались расположенные в Arctic Kongsfjorden (Норвегия) [31] и Kokkola (Финляндия) [32]. На рисунке 1 в масштабе показано расстояние между Тромсе и пунктами наблюдения, которые составляют соответственно 390 и 630 км.

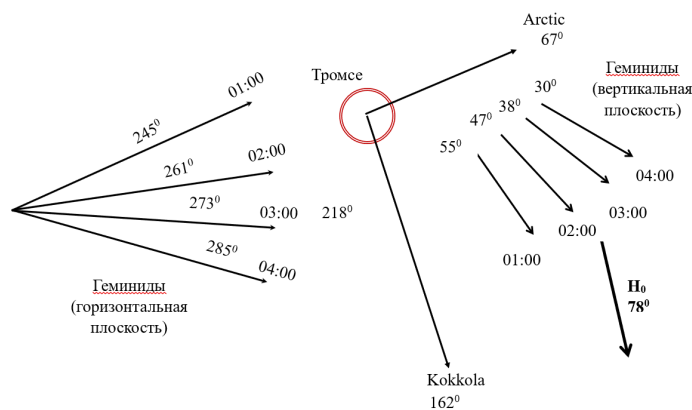


Рис. 1. Геометрия эксперимента

Область воздействия показана кругом с радиусом, соответствующим уровню половинной мощности антенны нагревного стенда на высоте 241 км. Оба пункта наблюдения находятся в пределах прямой видимости из области активного воздействия. На рисунке показаны азимуты из Тромсе на точки приема и изменение траектории движения метеорного потока Геминиды во время проведения эксперимента. Время указано мировое. Поскольку нами исследуется влияние космической пыли на магнитоориентированные неоднородности на рисунке показано наклонение магнитного поля Земли для Тромсе. Из рисунка следует, что траектория метеорного потока в вертикальной плоскости в разные промежутки времени близка к квазипродольной.

В горизонтальной плоскости для трассы Тромсе-Arctic во всё время проведения эксперимента направление движения метеорного потока будет продольным или квазипродольным. Для трассы Тромсе-Kokkola этот параметр будет квазипоперечным, а в интервале времени 01-02 UT можно ожидать что он будет поперечным, и соответствует условию отсутствия регистрации эффекта Доплера, обусловленного движущейся космической пылью.

Геофизическая обстановка во время проведения эксперимента характеризуется спокойным магнитным полем Земли, магнитный индекс $K=1$ [33]. Электронная концентрация во всех слоях ионосферы в период с 01:00 до 01:45 UT была низкой, так что на ионограммах станции DPS-4 Тромсе $f_0F_2, f_0F_1, f_0E, f_{min}$ не фиксируются [34]. В одном измерении в 02:00 UT $f_0F_2 = 4$ МГц, $f_{min} = 3,55$ МГц. Однако это измерение находится вне пределов анализируемого интервала времени. Таким образом, геофизическая обстановка является оптимальной для реализации нашего подхода, что позволяет считать, что неоднородности в области активного воздействия на ионосферу будут преимущественно искусственные,

а влияние естественных неоднородностей на ход эксперимента минимальным.

При проведении нагревного эксперимента отмечено некоторое отступление от заявленной схемы. Нагрев производился в течение четырех минут при двухминутной паузе и начался около часа и закончился к четырем часам мирового времени. Использовалась заявленная частота нагревной волны 5423 кГц, что, как нами отмечалось ранее, соответствует четвертой гармонике гиромагнитной частоты для высоты 241 км.

Запись производилась блоками по четыре минуты, с последующим скачиванием. Доступ к приёмнику Arctic Kongsfjorden был возможен протяжении всего эксперимента. Работа с приёмником Kokkola была возможна с 01:00 до 01:45 и затем с 02:18 до 03:00 UT по причине ограниченности доступа.

Полученные в формате wave файлы обрабатывались и вначале строились волновые формы сигнала с тем, чтобы определить наличие длительных возмущений, которые могут быть обусловлены крупными фрагментами метеорного потока [22]. После чего определялось распределение скоростей исходя из доплеровского сдвига частоты. В качестве примера такое распределение в начале нагревного эксперимента показано на рисунке 2.

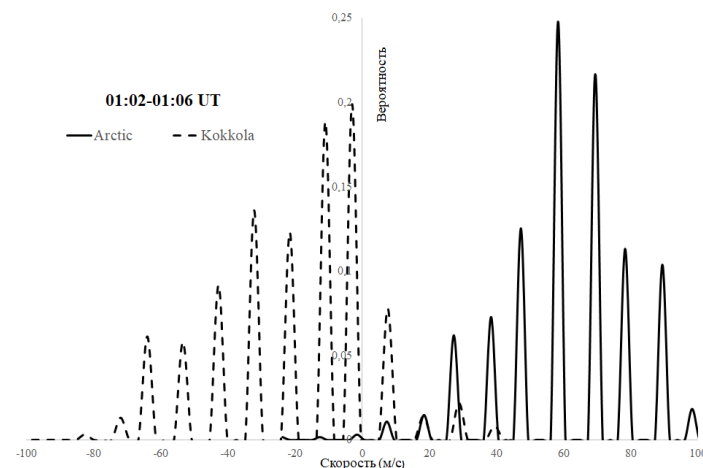


Рис. 2. Распределение скоростей в нагревном цикле 01:02-01:06 UT

Распределение скоростей имеет определенные дискретные значения. Максимальный шаг изменения скорости для Arctic равен 11,1 м/с, а для Kokkola 10,6 м/с, при том, что рассеянное излучение фиксируется из разных областей воздействия (рис. 1). Это может свидетельствовать о некотором общем начале наблюдаемых процессов, которое вероятнее всего является движущейся через область воздействия космической пылью. Прогнозируемый эффект отсутствия эффекта Доплера при поперечном движении метеорного потока, по отношению к трассе распространения рассеянного нагревного излучения Тромсе-Kokkola, обнаружился в нагревном цикле 01:32-01:36.

Для наглядности на одном рисунке приводится распределение скоростей для нагревных циклов 01:26-01:30, 01:32-01:36 и 01:38-01:42 (рис. 3). Масштаб скоростей на рисунке увеличен по сравнению с рис.2 с тем, чтобы показать их существенное изменение в интервале времени 01:32-01:36. Во время нагрева в интервалах 01:26-01:30 и 01:38-01:42 UT

распределения скоростей имеют схожие структуры и принципиально не изменились по сравнению с аналогичными распределениями в начале эксперимента (рис. 2). В цикле нагрева 01:32-01:36 распределение скоростей для пункта наблюдения Arctic не претерпело существенных изменений, а для трассы Kokkola оно изменилось кардинальным образом. Следовательно, наличие пыли в области активного воздействия на ионосферу влияет на динамические характеристики магнитоориентированных неоднородностей.

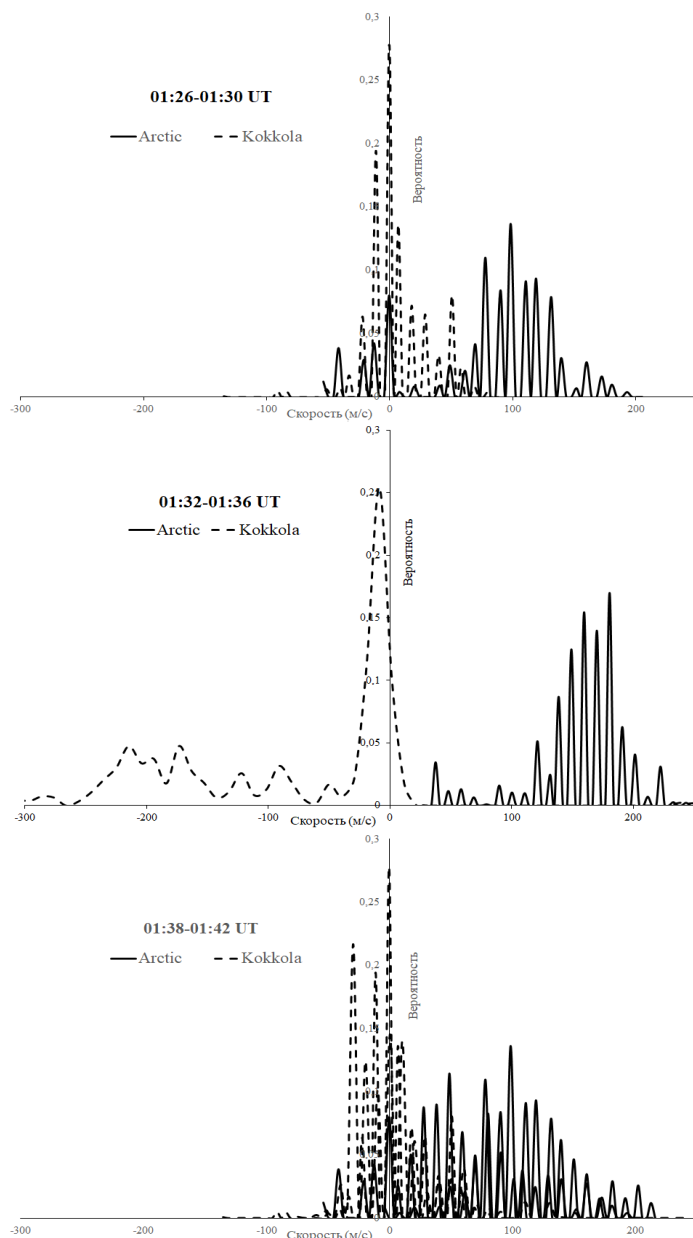


Рис. 3. Распределение скоростей в интервале времени 01:26-01:42 UT

В ходе наблюдений использовался метод [23] который позволяет определить средний размер отдельных магнитоориентированных неоднородностей, величины которых сопоставимы с длиной волны нагревного излучения. Наблюдения дают основания полагать, что скорости, приводимые в рукописи характерны для неоднородностей размером около 47 м.

Степень влияния космической пыли метеорного потока на скорости искусственных магнитоориентированных неоднородностей можно оценить, используя в качестве реперного интервал времени 01:26-01:32 UT, когда это влияние минимально, как следствие перпендикулярного движения потока относительно трассы Tromse-Kokkola. Исходя из такого подхода относительное приращение скорости для направления Kokkola составляет от 32 до 74 м/с.

В немногочисленных публикациях, посвященных исследованию запыленной плазмы в области активного воздействия на ионосферу, исследуется влияние пыли на формирование полярного мезосферного летнего эха [9] и вариации электронной концентрации [35]. Вместе с тем в публикациях [11, 36] показано, что в неустойчивой плазме возможна генерация плазменных вихрей. Можно ожидать, что в спектре наблюдаемого нами излучения, при наличии плазменного вихря, должно присутствовать распределение скоростей и амплитуд, характерное для вихревых структур. Исследуя спектральные характеристики рассеянной нагревной волны, удалось выявить структуры, имеющие центральную (большей амплитуды) и две боковые частоты (меньшей амплитуды) расположенные симметрично относительно первой. При пересчёте доплеровского сдвига частоты в скорость, для наблюдательных пунктов Arctic и Kokkola в нагревном цикле 01:02-01:06, такие структуры выглядят, как показано на рисунке 4.

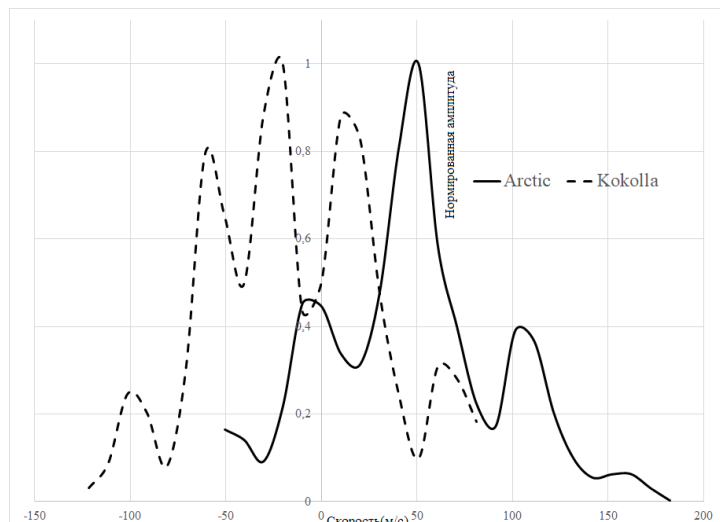


Рис. 4. Спектр участка записи в нагревном цикле 01:02-01:06

Если главные максимумы распределения принять за скорость дрейфа вихря, то боковые составляющие могут нести информацию о скорости движения магнитоориентированных неоднородностей в вихре. Таким образом, для направления Arctic скорость дрейфа вихря составляет 50 м/с, а скорость движения неоднородностей в вихре 61 м/с. Для направления Kokkola они соответственно будут равны 20 и 30 м/с.

Из структуры вихрей следует, что в данном случае вероятнее всего наблюдаются радиально-баллонные вихри [37]. В этой же работе делается вывод о том, что подобные вихревые структуры могут играть важную роль в процессе переноса тепла и частиц и тем самым служить структурными элементами сильной дрейфовой турбулентности, что с большой вероятностью приведёт к потерям энергии нагревной волны.

Выводы

1. Наличие космической пыли в области активного воздействия на ионосферу приводит:

- к существенному изменению динамических характеристик искусственных магнитоориентированных неоднородностей электронной концентрации, что способно влиять на помехоустойчивость трансконтинентального канала связи;
- потерям энергии нагревной волны вследствие формирования вихревых структур, что уменьшает эффективность закладки информационного сигнала в межслоевой ионосферный волновод.

2. Разработанный метод позволяет проводить исследования влияния космической пыли на ход экспериментов по активному воздействию на ионосферу с использованием естественных источников космической пыли, что даёт возможность проводить опыты без существенных экономических затрат, например на запуск ракет в область воздействия.

3. Проведение нагревных экспериментов синхронизированных с прохождением метеорных потоков может дать новые сведения о структуре метеорных потоков.

Благодарности

Автор выражает признательность д.ф.-м.н. Рябовой Г.О. (НИИ ПММ Томского государственного университета) за полезное обсуждение свойств метеорного потока Геминиды, а также Кошман Л.А. (Московский Планетарий) за предоставление пространственных данных о нем.

Литература

1. Galushko V.G., Bezrodny V.G., Koloskov A.V., et al. HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere. *Radio science*. Vol. 48, 2013, pp. 180-189. [doi:10.1029/2012RS005072](https://doi.org/10.1029/2012RS005072).
2. Yampolski Y., Milikh G., Zalizovski A. et al. Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation // *Front. Astron. Space Sci.* Vol. 6, 2019. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00012>
3. Сивоконь В.П. Оценка индекса мерцаний S4 в трансконтинентальных декаметровых радиолниях // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. Т. 17. №5. 2023. С. 14-24.
4. Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. и др. Пылевая плазма // *Успехи физических наук*. Т. 174. 2004. С. 495-544.
5. Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // *Успехи физических наук*. Т. 167. 1997. С. 57-99.
6. Фортвов В.Е., Ваулина О.С., Петров О.Ф. и др. Динамика макро-частиц в пылевой плазме в условиях микрогравитации // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. Т. 123. № 4. 2003. С. 798-815.
7. Kopnin S.I., Popel S.I., Morozova T.I. Modulational excitation of inhomogeneities in dusty ionospheric plasma // *Plasma Physics Reports*. Vol. 41. № 2, pp. 171-177. 2015.
8. Mann I., Gunnarsdottir T., Häggström I. et al. Radar studies of ionospheric dusty plasma phenomena // *Contributions to Plasma Physics*. Vol. 59. e201900005. 2019.
9. Mahmoudian A., Kosch M., Vierinen J. et al. New Technique for Investigating Dust Charging in the PMSE Source Region // *Geophysical Research Letters*. Vol. 47. [doi: 10.1029/2020GL089639](https://doi.org/10.1029/2020GL089639). 2020.
10. Gunnarsdottir T.L., Poggenpohl A., Mann I., et al. Modulation of polar mesospheric summer echoes (PMSEs) with high-frequency heating during low solar illumination // *Ann. Geophys.* Vol. 41. 2023, pp. 93-114.
11. Izvekova Yu., Popel S. Nonlinear Wave Structures and Plasma-Dust Effects in the Earth's Atmosphere // *Plasma Physics Reports*. Vol. 44, 2018, pp. 835-839.
12. Борисов Н.Д., Копнин С.И., Морозова Т.И., Попель С.И. О роли соударений с нейтрами в процессе модуляционного возбуждения

пылевых звуковых возмущений в запыленной ионосфере // *Физика плазмы*. Т. 45. № 4. 2019. С. 346-352.

13. Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I., Borisov N.D. Some aspects of modulational interaction in Earth's dusty ionosphere // *Physics of Plasmas*. Vol. 28. №3. 2021. P. 033703.

14. Sodha M., Mishra S. Modification of electron density in F layer of ionosphere by dust suspension // *Physics of Plasmas*. Vol. 24. 043705. [10.1063/1.4979988](https://doi.org/10.1063/1.4979988). 2017.

15. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 246 с.

16. Zalizovski A.V., Kashcheyev S.B., Yampolski Y.M., et al. Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence. *Radio science*. Vol. 44, RS3010, 2009, [doi:10.1029/2008RS004111](https://doi.org/10.1029/2008RS004111).

17. Безродный В.Г., Галушко В.Г., Райниш Б.В. Ракурсное рассеяние ВЧ радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях плоскостной ионосферы // *Радиофизика и радиоастрономия*. Т. 16. №1. 2011. С. 33-42.

18. Галушко В.Г., Безродный В.Г., Колосков А.В. и др. О возможном механизме «эффекта саморассеяния» мощных ВЧ сигналов в ионосфере // *Радиофизика и радиоастрономия*. Т. 17. № 2. 2012. С. 112-124.

19. Zook H.A. Spacecraft Measurements of the Cosmic Dust Flux // *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*, pp. 75-92. 2001.

20. Альвен Х., Арпенус Г. Эволюция Солнечной системы. М.: Мир, 1979. 511 с.

21. Ryabova G.O. A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 456. № 1. 2016. С. 78-84.

22. Андреев Г.В., Епишова А.Е., Рубцов Л.Н. и др. Структура метеорного потока Геминид 1966-1967 гг. по радионаблюдениям на $\lambda = 17$ м. // *Астрономия и геодезия*. Томск. Вып. 9. 1981. С. 81-93.

23. Сивоконь В.П. Новый метод исследования магнитоориентированных неоднородностей ионосферы с использованием программы определения радиосистем // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 60. № 2. 2020. С. 242-249.

24. Сивоконь В.П., Дружин Г.И. Геомагнитный фактор Dst-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 46. № 4. 2006. С. 521-524.

25. <https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?file-Name=20211214124973&Start=0000&End=0600>

26. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>

27. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. и др. Явления в высокоширотной F-области ионосферы, возникающие при её нагреве излучением с частотой вблизи четвёртой гармоники gyro частоты электронов // *Известия вузов. Радиофизика*. Том LVII, № 1. 2014. С. 1-22.

28. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., et al. Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave. *Geophysical research letters*. Vol. 38, L08802, 2011, [doi: 10.1029/2011GL046724](https://doi.org/10.1029/2011GL046724)

29. Blagoveshchenskaya N.F., Kalishina A.S., Borisova T.D., et al. Phenomena in the High-Latitude F Region of the Ionosphere under the Effect of Powerful HF Radio Waves at Frequencies above the Critical One of the F2 Layer. *Geomagnetism and Aeronomy*. Vol. 63. No. 6, 2023, pp. 757-769.

30. <http://kiwisdr.com/public/>

31. <http://arcticsdr.ddns.net:8073/?f=7158.0lsbz6>

32. <http://kiwisdr.oh6ai.fi:8073/?f=14100>

33. <https://flux.phys.uit.no/Kindice/>

34. <http://www.tgo.uit.no>

35. Mahmoudian A., Scales W.A. Temporal evolution of radar echoes associated with mesospheric dust clouds after turn-on of radio wave heating // *J. Geophys. Res.* Vol. 117 D06221. [doi:10.1029/2011JD017166](https://doi.org/10.1029/2011JD017166). 2012

36. Ижовкина Н.И. Взаимодействие вихревых структур в неустойчивой ионосферной плазме // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 53. № 3, 2013. С. 345-353.

37. Абурджания Г.Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2006. 325 с.

THE COSMIC DUST FACTOR IN THE IMPLEMENTATION OF GLOBAL DECAMETER RANGE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Vladimir P. Sivokon, *Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia;*

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, vsivokon@mail.ru

Abstract

Studies on ionosphere modification using heating facilities include results that turned out to be significantly lower than expected. For example, the problem of forming artificial field-aligned irregularity based on excitation of an ionospheric waveguide has not been fully solved. One of the reasons for such a discrepancy may be the presence of cosmic dust in the area of ionospheric impact. To test this hypothesis, a new method for studying the influence of cosmic dust on experiments on active impact on the ionosphere has been developed, which uses the results of research carried out by third-party organizations on the EISCAT heating facility. We use the method of multi-position diagnostics of field-aligned irregularity based on SDR (Software Defined Radio) technology and a natural source of cosmic dust - the Geminid meteor shower. As a result, it was experimentally shown that the presence of cosmic dust in the area of active influence on the ionosphere leads to a change in the characteristics of artificial field-aligned irregularity of the ionosphere and, consequently, the parameters of transcontinental ionospheric communication channels.

Keywords: *modification of the ionosphere, artificial magnetically oriented irregularities, cosmic dust*

References

- [1] V. G. Galushko, V. G. Bezrodny, A. V. Koloskov, et al., "HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere. Radio science," 2013. Vol. 48, pp. 180-189. doi:10.1029/2012RS005072
- [2] Y. Yampolski, G. Milikh, A. Zalizovski, et al., "Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation," *Front. Astron. Space Sci.*, 2019. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00012>.
- [3] V. P. Sivokon, "Estimation of the S4 scintillation index in transcontinental decameter radio links," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 5, pp. 14-24.
- [4] V. E. Fortov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, et al., "Dusty plasma," *Advances in Physical Sciences*. 2004. Vol. 174, pp. 495-544.
- [5] V. N. Tsytovich, "Plasma-dust crystals, drops and clouds," *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1997. Vol. 167, pp. 57-99.
- [6] V. E. Fortov, O. S. Vaulina, O. F. Petrov, et al., "Dynamics of macroparticles in dusty plasma under microgravity conditions," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2003. Vol. 123. No. 4, pp. 798-815.
- [7] S. I. Kopnin, S. I. Popel, T. I. Morozova, "Modulational excitation of inhomogeneities in dusty ionospheric plasma," *Plasma Physics Reports*. 2015. Vol. 41. No. 2, pp. 171-177.
- [8] I. Mann, T. Gunnarsdottir, I. Haggstrom, et al., "Radar studies of ionospheric dusty plasma phenomena," *Contributions to Plasma Physics*, 2019. Vol. 59. e201900005.
- [9] A. Mahmoudian, M. Kosch, J. Vierinen, et al., "New Technique for Investigating Dust Charging in the PMSE Source Region," *Geophysical Research Letters*. Vol. 47. 10.1029/2020GL089639.2020
- [10] T. L. Gunnarsdottir, A. Poggenpohl, I. Mann, et al., "Modulation of polar mesospheric summer echoes (PMSEs) with high-frequency heating during low solar illumination," *Ann. Geophys.* 2023. Vol. 41, pp. 93-114.
- [11] Yu. Izvekova, S. Popel, "Nonlinear Wave Structures and Plasma-Dust Effects in the Earth's Atmosphere," *Plasma Physics Reports*. 2018. Vol. 44, pp. 835-839.
- [12] N. D. Borisov, S. I. Kopnin, T. I. Morozova, S. I. Popel, "On the role of collisions with neutrals in the process of modulation excitation of dust sound disturbances in the dusty ionosphere," *Plasma Physics*. 2019. Vol. 45. No. 4, pp. 346-352.
- [13] T. I. Morozova, S. I. Kopnin, S. I. Popel, N. D. Borisov, "Some aspects of modulational interaction in Earth's dusty ionosphere," *Physics of Plasmas*. 2021. Vol. 28. No.3. P. 033703.
- [14] M. Sodha, S. Mishra, "Modification of electron density in F layer of ionosphere by dust suspension," *Physics of Plasmas*. 2017. Vol.24. 043705. 10.1063/1.4979988
- [15] A. V. Gurevich, E. E. Tsedilina, "Ultra-long-range propagation of short radio waves," Moscow: Nauka, 1979. 246 p.
- [16] A. V. Zalizovski, S. B. Kashcheyev, Y. M. Yampolski, et al., "Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence," *Radio science*, 2009. Vol. 44, RS3010, doi:10.1029/2008RS004111
- [17] V. G. Bezrodny, V. G. Galushko, B. V. Rainish, "Aspect scattering of HF radio waves on magnetically oriented irregularities of the flat-layered ionosphere," *Radiophysics and Radio Astronomy*. 2011. Vol. 16. No. 1, pp. 33-42.

- [18] V. G. Galushko, V. G. Bezrodny, A. V. Koloskov, et al., "On the possible mechanism of the "self-scattering effect" of powerful HF signals in the ionosphere," *Radiophysics and Radio Astronomy*. 2012. Vol. 17. No. 2, pp. 112-124.
- [19] H. A. Zook, "Spacecraft Measurements of the Cosmic Dust Flux," *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*. 2001, pp. 75-92.
- [20] H. Alven, G. Arrhenius, "Evolution of the Solar System," Moscow: Mir, 1979. 511 p.
- [21] G. O. Ryabova, "A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. Vol. 456. No. 1. C. 78-84.
- [22] G. V. Andreev, A. E. Epishova, L. N. Rubtsov, et al., "Structure of the Geminid meteor shower of 1966-1967 based on radio observations at $\lambda = 17$ m," *Astronomy and Geodesy*. Tomsk. 1981. Issue 9, pp. 81-93.
- [23] V. P. Sivokon, "New method for studying magnetically oriented ionospheric irregularities using a radio system identification program," *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. Vol. 60. No. 2, pp. 242-249.
- [24] V. P. Sivokon, G. I. Druzhin, "Geomagnetic factor of Dst variations in selective excitation of ionospheric characteristic waves," *Geomagnetism and Aeronomy*. 2006. Vol. 46. No. 4, pp. 521-524.
- [25] <https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?fileName=20211214124973&Start=0000&End=0600>
- [26] <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>
- [27] T. D. Borisova, N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishin, et al., "Phenomena in the high-latitude F-region of the ionosphere arising from its heating by radiation with a frequency near the fourth harmonic of the electron gyrofrequency," *Bulletin of Universities. Radiophysics*. 2014. Vol. LVII, No. 1, pp. 1-22.
- [28] N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, T. K. Yeoman, et al., "Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave," *Geophysical research letters*. 2011. Vol. 38, L08802, doi:10.1029/2011GL046724.
- [29] N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishina, T. D. Borisova, et al., "Phenomena in the High-Latitude F Region of the Ionosphere under the Effect of Powerful HF Radio Waves at Frequencies above the Critical One of the F2 Layer," *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023. Vol. 63. No. 6, pp. 757-769.
- [30] <http://kiwisdr.com/public/>
- [31] <http://arcticsdr.ddns.net:8073/?f=7158.0lsbz6>
- [32] <http://kiwisdr.oh6ai.fi:8073/?f=14100>
- [33] <https://flux.phys.uit.no/Kindice/>
- [34] <http://www.tgo.uit.no>
- [35] A. Mahmoudian, W. A. Scales, "Temporal evolution of radar echoes associated with mesospheric dust clouds after turn-on of radio wave heating," *J. Geophys. Res.*, 2012. Vol. 117 D06221. doi:10.1029/2011JD017166
- [36] N. I. Izhovkina, "Interaction of vortex structures in unstable ionospheric plasma," *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53. No. 3, pp. 345-353.
- [37] G. D. Aburjania, "Self-organization of nonlinear vortex structures and vortex turbulence in dispersing media," Moscow: URSS: LENAND, 2006. 325 p.

Information about author

Vladimir P. Sivokon, Chief researcher of the laboratory of "Electromagnetic radiation" of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia;
Professor of the Department of "Power Installations and Electrical Equipment of Ships" of Kamchatka State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia