

УДК 551.510.537

МОНИТОРИНГ ОБЛАСТИ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПОМОЩИ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. Д. В. Чугунин¹, *, А. А. Чернышов¹, И. Л. Моисеенко¹,
М. Е. Виктор², М. М. Могилевский¹

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

²Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия

*e-mail: dimokch@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.

После доработки 26.12.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

В работе предложен метод исследования высотно-временных характеристик физических процессов, происходящих в области аврорального ускорения электронов. Используя авроральное километровое радиоизлучение, которое генерируется на локальной гирочастоте электронов, можно получить высотное распределение свойств источника излучения в авроральной области, а использование долговременных спутниковых измерений аврорального километрового радиоизлучения позволяет отследить эволюцию этих свойств во времени. Такой подход к анализу аврорального километрового радиоизлучения дает возможность дистанционно получать информацию о вариациях свойств его источника одновременно вдоль магнитной силовой линии области ускорения. Этот подход был использован в данной работе для анализа аврорального километрового радиоизлучения, зарегистрированного на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в эксперименте ПОЛЬРАД. В результате анализа было найдено регулярное изменение вейвлет-спектров флуктуаций аврорального километрового радиоизлучения вдоль магнитной силовой линии. В выбранном частотном интервале, при практически постоянной мощности излучения, спектр флуктуаций на большой высоте носит степенной характер, а на малой – распределение флуктуаций становится равномерным по всем характерным временам. Такая трансформация спектра указывает на нелинейные процессы в источнике аврорального километрового радиоизлучения.

DOI: 10.31857/S0016794020040033

1. ВВЕДЕНИЕ

Авроральное километровое радиоизлучение (далее АКР), впервые зарегистрированное на спутнике Электрон-2 в 1965 г. [Бенедиктов и др., 1965], представляет собой мощное радиоизлучение Земли в частотном диапазоне от 30 до 700 кГц, максимум которого находится в диапазоне от 100 до 300 кГц. АКР генерируется в результате развития циклотронной мазерной неустойчивости [Wu and Lee, 1979] во внутренней магнитосфере Земли, в областях с пониженной плотностью плазмы (каверна Кальверта) [Calvert, 1981], где плазменная частота ω_{pe} ниже гирочастоты электронов Ω_e . АКР распространяется от источника (вверх от Земли), в основном, в быстрой необыкновенной волне R-X моды. Источники АКР находятся на высотах от 2 до 10 тыс. км на инвариантных широтах около 70° [Alexander and Kaiser, 1976; Kurth et al., 1975]. АКР играет важную роль в глобальной динамике авроральной плаз-

мы: от 1 до 10% энергии электронов может уходить в излучение, при этом полная энергия излучения составляет порядка 10^7 Вт, а в активные периоды достигает 10^9 Вт [Gurnett, 1974]. Источником энергии излучения служат потоки энергичных частиц, инжектируемых из хвоста магнитосферы во время геомагнитных возмущений и, поэтому, интенсивность АКР сильно зависит от изменения геомагнитной активности [Voots et al., 1977]. Излучения типа АКР характерны для всех планет с магнитным полем и наблюдаются около Юпитера, Сатурна, Урана, спутника Юпитера Ио [Zarka, 1998].

АКР распространяется в направлении от Земли внутри конуса излучения, растров которого определяется условиями в источнике [Могилевский и др., 2007]. При условии постоянства потока энергичных частиц из хвоста магнитосферы, высота спутника над источником и растров конуса излучения определяют длительность измере-

ния АКР. Орбита спутника ИНТЕРБОЛ-2 была выбрана таким образом, что длительное время спутник находился на одной магнитной оболочке, что позволило проводить измерения АКР до нескольких часов. Эти измерения позволили отследить долговременную эволюцию процессов в авроральных областях, используя АКР как средство дистанционного мониторинга. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с измерениями *in situ* для исследования длиннопериодных процессов и методически близок к оптическим измерениям свечения ионосферы в различных спектральных каналах (в качестве примера можно упомянуть инструмент UVI на спутнике POLAR [Uritsky et al, 2002]). В данной работе мы используем измерения АКР для мониторинга авроральной области и предлагаем метод исследования, с помощью которого можно получить пространственно-временные (если точнее, то высотнo-временные) характеристики физических процессов, происходящих в области аврорального ускорения электронов. Используя то, что генерация АКР происходит на локальной гирочастоте электронов, спектральные характеристики излучения позволяют получить высотное распределение свойств плазмы в авроральной области, а долговременные измерения позволяют отследить эволюцию этих свойств во времени.

В этой работе представлен метод анализа и приведены первые результаты, полученные этим методом.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Мы использовали результаты измерений электромагнитного поля на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 [Галеев и др., 1996], который был запущен 29 августа 1996 г. на высокополюсную орбиту (начальные значения высот перигея – 769 км и апогея – 19211 км, наклонение 62.8° к плоскости земного экватора). Измерения поля проводились при помощи эксперимента ПОЛЬРАД [Ханаш и др., 1998], работавшего в режиме спектрометра. В этом режиме электрические компоненты поля измерялись в диапазоне частот 4 кГц–1 МГц при помощи последовательного частотного анализатора с полосой 4 кГц и временным разрешением 6 секунд.

На рисунках 1–3 представлены результаты анализа электромагнитного излучения, зарегистрированного 22 ноября 1997 г. при умеренной геомагнитной активности ($AE \sim 500\text{--}600$ нТл) в вечернем секторе магнитосферы ($\sim 19\text{--}20$ MLT). Измерения проводились при движении спутника с высоты 18900 км до 15600 км на инвариантных широтах $\sim 70^\circ\text{--}62^\circ$. На рисунке 1а приведена динамическая спектрограмма АКР, зарегистрированная в частотном диапазоне $\sim 100\text{--}900$ кГц в утреннем секторе, в интервале времени 05:45–

06:35 UT. Интегральная интенсивность излучения более высокая в интервале 05:45–06:10 UT и достигает значений порядка 10^{-15} Вт/м²Гц. Во всем интервале анализа наиболее интенсивная часть спектра находится в диапазоне частот 119–537 кГц. Эти границы спектра показаны на рисунке горизонтальными штриховыми линиями. Как определялись эти границы, будет сказано ниже, в описании рис. 3. Нижняя частотная граница спектра соответствует высоте источника АКР ~ 9000 км над поверхностью Земли. Стоит отметить, что высота спутника в период измерений варьируется от 16000 км до 19000 км, таким образом, частота ~ 25 кГц соответствует наименьшему значению частоты АКР, которая может быть зарегистрирована на спутнике с данной орбитой. При этом верхняя частотная граница спектрограммы значительно изрезана, т.е. характеризуется резкими подъемами и падениями мощности излучения в диапазоне 500–800 кГц (высота нахождения источника приблизительно варьируется от 2500 до 1500 км от Земли).

Такая изрезанность верхней частоты отсечки спектра может быть связана с нарушениями условий развития циклотронной неустойчивости в результате инъекции ионосферной плазмы в область источника излучения [Моисеенко и др., 2013]. Пример данных, отобранных для анализа, приведен на рис. 1б. Горизонтальной жирной линией на рис. 1а отмечена частота 270 кГц, для которой приведено изменение мощности излучения на этой частоте (рис. 1б). Видно, что сигнал носит нестационарный и многомасштабный характер, что характерно для авроральной области [Чернышов и др., 2013, Chernyshov et al., 2017]. Для таких процессов наиболее подходящим методом анализа является вейвлет-преобразование (вейвлет-анализ), позволяющее одновременно получить распределение мощности выбранного сигнала, как по частотам/масштабам, так и по времени. При обработке сигнала обычно интересуются величиной флуктуаций на разных масштабах, потому что по ним можно получить сведения о происхождении этих флуктуаций. Цель вейвлет-анализа как раз и состоит в том, чтобы предоставить средства для проведения такого исследования.

Необходимость применения вейвлет-преобразования также обусловлена ограниченной длиной анализируемых рядов данных. При анализе нестационарных сигналов ограниченной длины за счет свойства локальности вейвлетов можно получить преимущество перед преобразованием Фурье, которое дает только глобальные сведения о частотах (масштабах) анализируемого сигнала, так как используемая при этом система функций в виде $\exp(i\omega t)$ определена на бесконечном интервале [Daubechies, 1991].

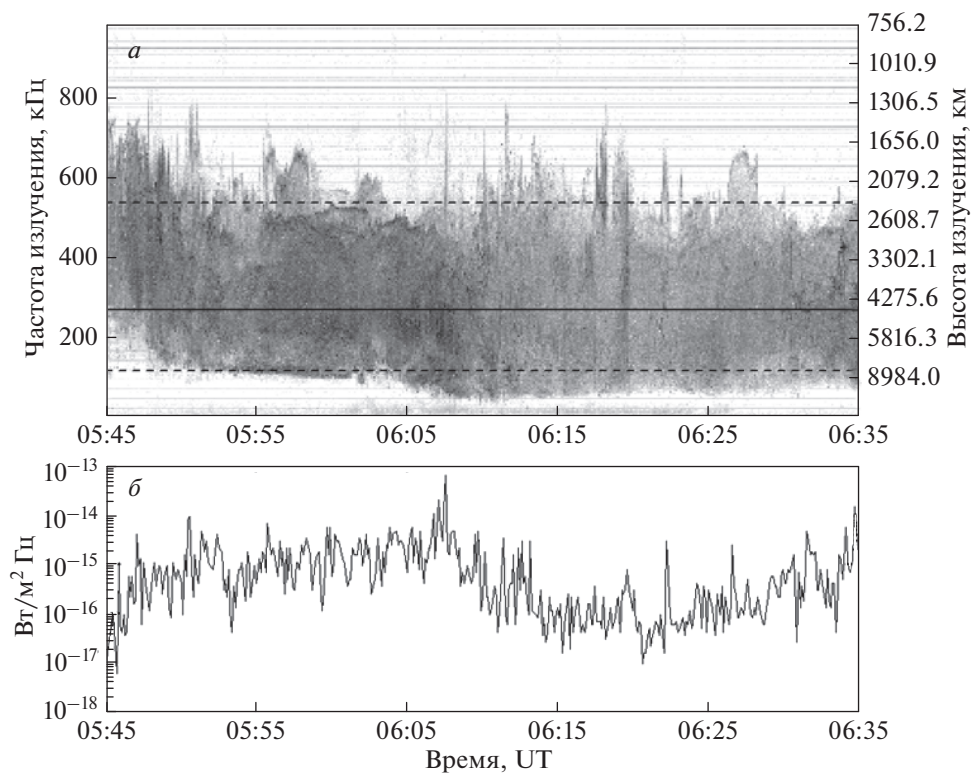


Рис. 1. Верхняя панель (а) – динамическая спектрограмма мощности АКР в частотно-временном пространстве по измерениям со спутника ИНТЕРБОЛ-2 за 22.11.1997 г. Мощность излучения кодирована интенсивностью черного цвета (белый цвет – отсутствие сигнала). Горизонтальные линии на спектрограмме – бортовые помехи. Правая вертикальная шкала – высота над поверхностью Земли, на которой произошло излучение соответствующей частоты. Нижняя панель (б) – вариации интегральной мощности АКР на частоте 270 кГц.

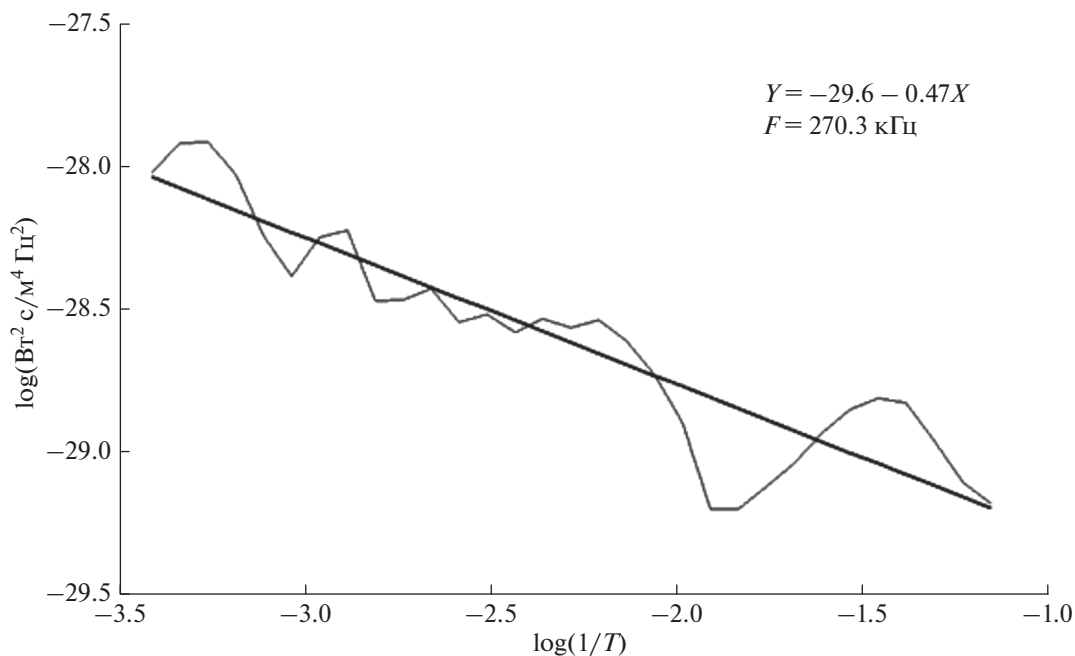


Рис. 2. Усредненный вейвлет-спектр АКР (тонкая линия) на частоте 270 кГц и его наклон (жирная линия) в двойном логарифмическом масштабе. По горизонтальной оси отложена “частота” вейвлет-преобразования (обратная величина от временно́го вейвлет-масштаба). По оси ординат отложен десятичный логарифм спектральной мощности вейвлет-преобразования сигнала.

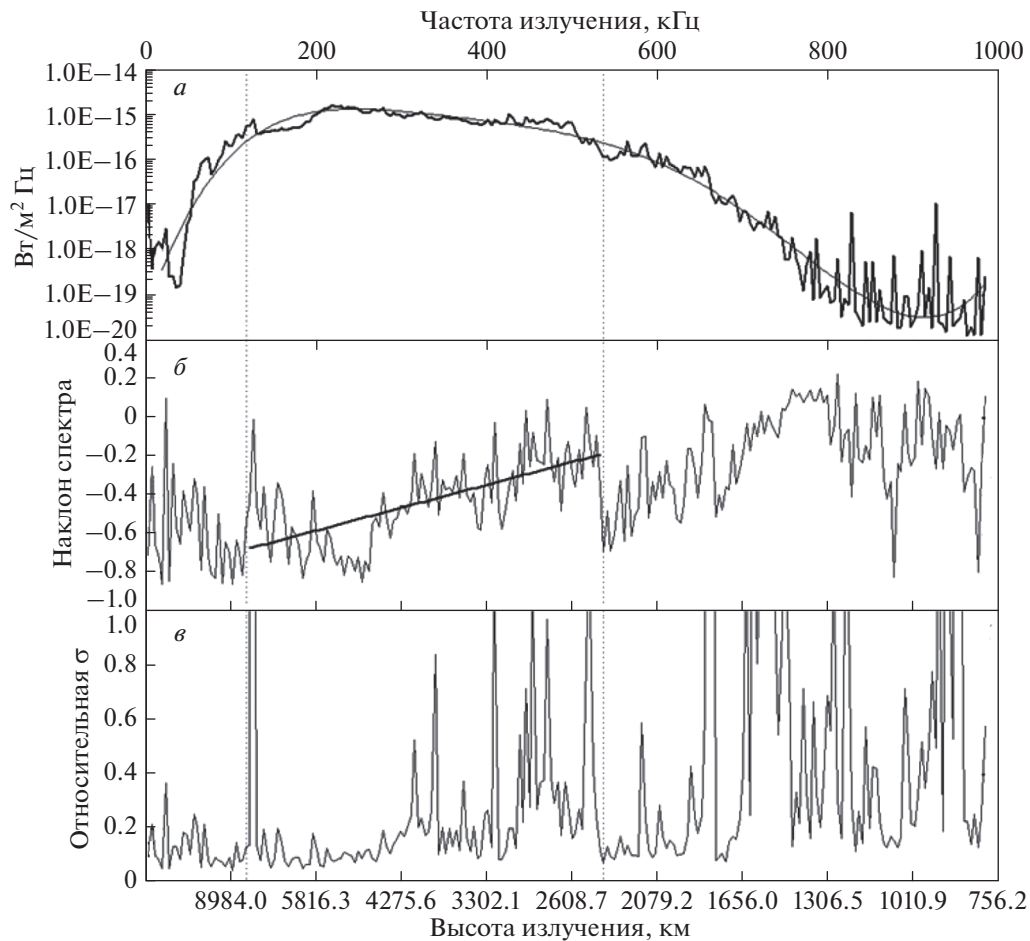


Рис. 3. (а) – усредненный за весь выбранный временной интервал спектр мощности, (б) – изменение наклона вейвлет-спектра от высоты (или частоты) излучения АКР (тонкая линия). Жирная линия – линейное приближение зависимости наклона вейвлет-спектра от частоты излучения, (в) – отношение среднеквадратичного отклонения σ к самой величине наклона вейвлет-спектра при ее вычислении для графика (б). По горизонтали: сверху – частоты измерения; внизу – высота источников излучения АКР.

В случае нестационарного сигнала нелогично подвергать сигнал преобразованию Фурье целиком. Гораздо эффективнее разбить его на отрезки, частотный состав которых более–менее однороден, и применять преобразование Фурье к отдельным частям – в этом смысл оконного преобразования Фурье. Согласно принципу неопределенности, применяя оконное преобразование Фурье, добиться сколько-нибудь значительной локализации мощности сигнала во времени можно только за счет потери локализации спектральной функции по частоте.

Это справедливо и для вейвлет-преобразования, преимущество которого заключается лишь в большей гибкости вейвлетов, используемых в качестве базисных функций, так как размер частотно-временных окон в этом случае не является фиксированным. Зато это позволяет одновременно локализовать во времени резкие градиенты или разрывы в сигнале и выполнять достаточ-

но детальный частотный анализ на большом временном промежутке, имея один и тот же набор базисных функций [Головчанская и др., 2012]. В терминах традиционного анализа сигналов фильтры, связанные с оконным преобразованием Фурье, называют фильтрами с постоянной полосой пропускания, тогда как вейвлеты можно рассматривать как фильтры с постоянной относительной полосой пропускания, поскольку их ширина по обеим переменным линейно зависят от их положения [Дремин и др., 2001].

Для пространственно-временного анализа измерений АКР мы использовали вейвлет-преобразование с базовой функцией – вейвлет Морле 6-го порядка (в честь J. Morlet, впервые употребившего термин “вейвлет” в научной литературе) [например, Toghiani and Compo, 1998]. Данный вейвлет хорошо зарекомендовал себя для частотно-временного анализа процессов, у которых спектральный состав меняется во времени, кроме

того, у него отсутствует смещение по частоте. В дальнейшем, для каждой частоты спектра излучения, полученного с прибора ПОЛЬРАД (как правило, это 240 или 480 частотных каналов), было применено вейвлет-преобразование и построен вейвлет-спектр его мощности. Полученный спектр для каждой частоты представляет собой трехмерную матрицу с координатами: (1) время, (2) временной масштаб (скейлинг) или частота, а также (3) мощность. Для облегчения дальнейшего анализа и в качестве первоначального этапа исследования было проведено усреднение спектра по времени. В результате для каждого частотного канала прибора ПОЛЬРАД был получен усредненный за выбранный интервал времени спектр мощности вейвлет-преобразования.

На рисунке 2 (тонкая линия) приведен пример такого усредненного вейвлет-спектра АКР, построенного для частоты 270 кГц. График представлен в двойном логарифмическом масштабе. По горизонтальной оси отложена «частота» вейвлет-преобразования, т.е. величина обратная к скейлингу – масштабу вейвлета по времени, а по оси ординат – его мощность. Из графика видно, что мощность спадает с уменьшением масштаба, что характерно для такого рода процессов. Для сравнения вейвлет спектров для различных высот аппроксимируем спектр линейной функцией и введем новую характеристику – наклон спектра мощности вейвлет-преобразования. Наклон спектра, или другими словами – индекс масштабирования, определяется из наклона регрессионной кривой. Степенной характер на различных масштабах указывает на нестационарный процесс со свойствами масштабирования. На рисунке 2 жирной линией показан наклон спектра, коэффициент которого составляет $k = -0.47$ (среднеквадратичное отклонение (СКО) равно 0.041, что свидетельствует о применимости линейной регрессии). Полученный таким образом наклон спектра позволяет выявить свойства масштабирования. Эти свойства характеризуют пространственно-временные параметры физических процессов, отвечающих за генерацию АКР в авроральной области. Выбранная частота соответствует высоте источника излучения ~4600 км над уровнем Земли.

С использованием описанной выше методики были проанализированы вариации мощности на всех 240 частотах и получены наклоны вейвлет-спектров за выбранный период измерения. На рисунке 3а показан усредненный за весь временной интервал спектр АКР, на рис. 3б – зависимость наклона усредненного вейвлет-спектра от высоты источника АКР, а на рис. 3в показано относительное СКО, т.е. отношение СКО к самой величине наклона, линейной регрессии, которая применялась для вычисления наклонов вейвлет-спектра для различных частот АКР. Также на ри-

сунке вертикальными линиями показаны частоты, внутри которых наблюдается наиболее интенсивный сигнал. Этот частотный диапазон определялся следующим образом.

Первоначально усредненный спектр (его десятичный логарифм) аппроксимировался полиномом 5-го порядка, эта аппроксимация показана тонкой линией на рис. 3а. Это делалось для того, чтобы исключить выбросы в спектре, вызванные помехами на определенных частотах. Далее нижняя граница сигнала находилась следующим образом: $\min + (\max - \min) / 1.2$, где \min – минимальное значение аппроксимированного спектра, а \max – его максимальное значение. Другими словами, в логарифмическом масштабе минимальный уровень сигнала брался в 1.2 раза меньше максимума, кроме того учитывалось наличие уровня фона. Эти границы спектра показаны на рис. 1а горизонтальными пунктирными линиями и в этом частотном диапазоне мы предлагаем исследовать свойства АКР. Из рисунка 3в видно, что СКО на выбранном частотном интервале остается низким относительно величины наклона, из чего можно сделать вывод, что в большинстве случаев линейное приближение адекватно описывает вейвлет-спектр, построенный в двойном логарифмическом масштабе. При этом если наклон более пологий, то относительная ошибка в определении наклона вейвлет-спектра становится больше. На графике 3б можно выделить три области в зависимости от высоты источника:

1. 8–9 тыс. км и выше. В этой области происходит спадание интенсивности излучения ($W < 2 \times 10^{-16}$ Вт/м² Гц) и наклон вейвлет-спектра носит случайный, флуктуационный характер.

2. От 2.5 до 8 тыс. км. В этой области излучение наиболее интенсивно и меняется в диапазоне $W \sim 1.6 \times 10^{-15} - 2 \times 10^{-16}$ Вт/м² Гц, причем наклон спектра носит более регулярный характер, уменьшаясь от низких высот к большим. Для этого диапазона частот было построено линейное приближение зависимости наклонов вейвлет-спектра от частоты АКР (высоты его излучения). Для наглядности на рис. 3б это показано жирным отрезком; хорошо видно, что наклон уменьшается с увеличением частоты.

3. Ниже 2.5 тыс. км. В этой области происходит уменьшение интенсивности излучения и наклон вейвлет-спектра носит случайный характер, аналогично первой области.

Для проверки правильности используемого анализа было проведено тестирование с использованием модельных сигналов: использовался постоянный тестовый сигнал на выделенной частоте с добавлением разнообразных шумов. В результате обработки была выделена искомая частота, где отсутствовали побочные гармоники. Такая калибровка показала, что в результатах на-

стоящего исследования отсутствуют нефизические эффекты, связанные с вычислительной процедурой.

Рассмотренный случай не является уникальным. На самом деле такие события наблюдаются часто, но в данной работе мы рассматриваем два случая. На рисунке 4 представлены полученные результаты для другого случая после описанной выше обработки измерений АКР на спутнике ИНТЕРБОЛ-2. На панели рис. 4а показаны измерения АКР, цветом показана мощность сигнала (черный цвет – максимальное значение измерений), ниже, на панели 4б показан усредненный спектр АКР. Штриховыми линиями выделена область частот, в которой сигнал АКР наиболее интенсивен. Эта область определялась аналогично первому случаю. На панели 4в показаны значения наклона вейвлет-спектров для разных частот (или высот, т. к. частота АКР соответствует гирочастоте в области генерации), на рис. 4г приведено относительное СКО при вычислении коэффициента наклона.

Если сравнивать этот случай с предыдущим, то видно, что интенсивность АКР во втором случае на порядок ниже по сравнению с первым (максимум усредненного спектра равен $\sim 2 \times 10^{-16}$ Вт/м², в то время как в первом случае это была величина отсечки слабого сигнала). Поэтому во втором случае диапазон выбранных границ значимого сигнала по частотам несколько уже. Кроме того, наклоны вейвлет спектра тоже оказываются меньшими по модулю. Относительное СКО при определении наклона в значимой области спектра в среднем остается на уровне 0.3 и меньше, что позволяет говорить о том, что линейная регрессия имеет смысл. Сильное увеличение СКО на некоторых частотах вызвано, скорее всего, наличием внешних помех на приемнике. Из рисунка 4в видно, что наклон спектра в области значимых сигналов меняется с высотой, хотя и не так явно, как в первом случае. Это свидетельствует о неоднородности условий генерации вдоль магнитной силовой линии в области аврорального ускорения частиц. Различия между первым и вторым случаем можно объяснить тем, что не существует идентичных ситуаций, и состояние околоземной плазмы зависит от многих факторов. В первом случае геомагнитная активность выше, *AE*-индекс был выше 500 нТл в течение долгого времени, в то время как для второго случая геомагнитный индекс *AE* превышал значение 500 нТл только на интервале времени менее получаса, что соответствует меньшей интенсивности АКР.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что размеры области генерации АКР по высоте составляют несколько тысяч км, а ее широтно-долготные масштабы определяются

областью высыпаний энергичных электронов. Излучение распространяется от Земли внутри конуса излучения, размеры которого определяется условиями в источнике [Могилевский и др., 2007]. Следует отметить, что, несмотря на успехи в области исследования источников АКР [Буриная и др., 2007, Burinskaya and Rauch, 2012], ряд вопросов, связанных с выходом излучения из локального волновода, до настоящего времени остаются открытыми. Часть электронов, попадающих в конус потерь, достигают ионосферы и создают там дополнительную ионизацию, которая диффундирует, в том числе, и в магнитосферу, заметно меняя условия развития мазерной неустойчивости.

Эффективность генерации циклотронной мазерной неустойчивости зависит от величины отношения плазменной частоты ω_{pe} к гирочастоте электронов Ω_e , причем, чем меньше это отношение, тем больше амплитуда АКР. Эти эффекты приводят к существенному изменению условий возбуждения АКР и его свойств на разных высотах, что было наглядно подтверждено результатами наших исследований особенностей генерации АКР на основе данных спутника ИНТЕРБОЛ-2.

Поскольку важным свойством нестационарных турбулентных полей является их масштабированность, в настоящей работе применялся вейвлет-анализ, так как основной областью применения методов вейвлет-преобразования является анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени и неоднородных по пространству. Благодаря своим свойствам вейвлеты нашли широкое применение в последнее время для решения многих задач в физике, математике, биологии, технике и других областях (см. обзор [Дремин и др., 2001] и ссылки там). Вейвлет-преобразование позволяет одновременно получить распределение мощности сигнала, как по частотам (масштабам), так и по времени. Это связано с тем, что условие допустимости для материнского вейвлета [Малла, 2005] позволяют эффективно устранять тренды, то есть неслучайные функции, присутствующие в данных и приводящие к искажению истинного скейлинга.

Как известно, динамика сложных нелинейных систем обнаруживает масштабную инвариантность (скейлинг, самоподобие), выражающуюся в наклоне спектра, которая проявляется в степенных зависимостях различных характеристик системы от временного (пространственного) масштаба. Математический аппарат, основанный на вейвлет-преобразованиях, использованный в настоящей работе, является способом описания систем с самоподобием. Ранее вейвлет-анализ был применен к описанию различных процессов в авроральной зоне. Например, вейвлеты были использованы при анализе полей в альве-

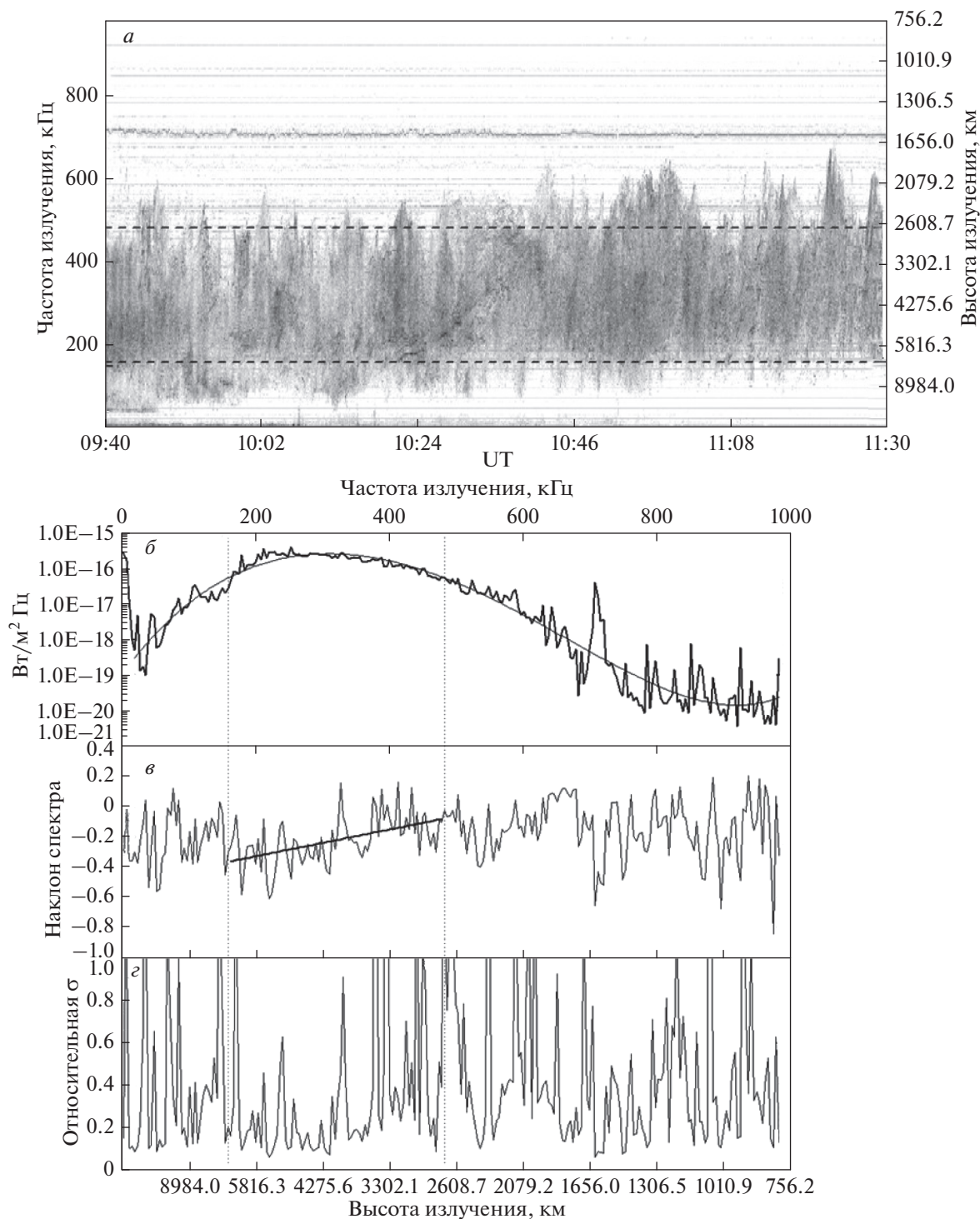


Рис. 4. Пример обработки сигнала для второго случая. Верхняя панель (*a*) – динамическая спектрограмма мощности АКР в частотно-временном пространстве по измерениям со спутника ИНТЕРБОЛ-2 за 13.10.1997 г. Мощность излучения кодирована интенсивностью черного цвета (черный цвет-максимум сигнала). Нижняя панель: (*b*) – усредненный за весь выбранный временной интервал спектр мощности, (*c*) – изменение наклона вейвлет-спектра от высоты (или частоты) излучения АКР (тонкая линия). Жирная линия – линейное приближение зависимости наклона вейвлет-спектра от частоты излучения, (*d*) – отношение среднеквадратичного отклонения σ к самой величине наклона вейвлет-спектра при ее вычислении для графика (*c*). По горизонтали: вверху – частоты измерения; внизу – высота источников излучения АКР.

новской турбулентности [Tam et al., 2005] для изучения их перемежаемости, а также в работах [Golovchanskaya et al., 2006; Головчанская и др., 2012], где количественно исследовалось их самоподобие (причем степенной характер зависимости мощности полей от масштаба в широком диапазоне масштабов был надежно идентифицирован благодаря применению вейвлет-анализа и не мог быть установлен с использованием более грубых спектральных методов). В работе [Lund, 2010] сравниваются оконное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование применительно к электрическим измерениям спутника FAST вблизи его апогея и показывается преимущество вейвлетов. Масштабная инвариантность флуктуаций аврорального свечения была обнаружена и исследована в [Golovchanskaya et al., 2008; Kozelov and Golovchanskaya, 2010]. Теоретический анализ структуры педерсеновской и холловской проводимостей на ночной стороне аврорального овала и сравнение полученных результатов со скейлинговыми индексами, характеризующими структуру полярных сияний, приведен в работах [Chernyshov et al., 2013, 2017]. Также существует большое число работ, в которых отмечались масштабная инвариантность (скейлинг) и степенные спектры, характерные для многих величин в магнитосферно-ионосферной плазме и суббулевой динамики (например, [Milovanov et al., 1996; Kozelov et al., 2008; Golovchanskaya et al., 2008]).

С помощью такого подхода в представленном исследовании были получены усредненные вейвлет-спектры АКР и определены наклоны спектров, которые характеризуют свойства масштабирования. Из полученных результатов следует, что наклон спектра меняется с высотой, и в первом приближении можно сказать, что, чем меньше высота излучения, тем получается более пологий вейвлет-спектр. Это свидетельствует о том, что на небольших высотах роль высокочастотных флуктуаций АКР выше, чем на больших высотах. Если предположить, что флуктуации вызваны пространственными неоднородностями, то из-за того, что плазма в этой области замагничена и сечение магнитной силовой трубки уменьшается при приближении к Земле, это приводит к тому, что все пространственные масштабы “сжимаются”. В этом случае при идеальных условиях (стационарность и однородность), когда все масштабы изменяются согласно размеру магнитной силовой трубки, наклон спектра не должен меняться с высотой. Однако по результатам нашей обработки спутниковых данных наблюдается изменение наклона спектра в зависимости от высоты. Следует отметить, что говорить о магнитной силовой трубке можно только в предположении об эквипотенциальности магнитных силовых линий. Но в зоне аврорального ускорения заряженных частиц это предположение может не выполняться.

Возможно, это может влиять на изменение наклона вейвлет-спектра с высотой.

Однако, скорее всего на спутнике наблюдаются временные изменения АКР, поскольку движение космического аппарата относительно медленное и регистрация АКР происходит не в самом источнике, а в конусе распространения сигнала. Таким образом, наклон вейвлет-спектра на определенной высоте (частоте) наиболее вероятно характеризует временное изменение развития циклотронной мазерной неустойчивости на этом участке области ускорения энергичных заряженных частиц, а разный наклон спектра на разных высотах свидетельствует о том, что рассматриваемые процессы являются нестационарными и неоднородными по высоте.

Генерация АКР зависит от потока ускоренных электронов из хвоста магнитосферы, однако в то же время существует поток холодной плазмы из возмущенных областей ионосферы, что также влияет на инкремент циклотронной мазерной неустойчивости и приводит к изменениям условий в области генерации АКР. В результате сложного нелинейного взаимодействия ионосферной и магнитосферной плазмы, условия для возбуждения АКР будут существенным образом разные на разных высотах, что и отражается в изменении наклона спектра. Измерения АКР могут рассматриваться в качестве индикатора геомагнитной активности и процессов, протекающих в области аврорального ускорения заряженных частиц.

АКР играет важную роль в динамике околоземной плазмы и в процессах, которые происходят в магнитосфере и ионосфере, так как существует сильная корреляция между АКР и авроральным электроджетом – индексом *AE* [Voots et al., 1977]. Кроме того, интенсивные электронные высыпания с распределением по энергиям, имеющим форму “перевернутой буквы V”, также напрямую связаны с генерацией излучения [Venson et al., 1980]. Как было замечено выше, исследования АКР являются способом дистанционного зондирования по высоте магнитных силовых линий в околоземном пространстве. Это свойство было использовано в настоящем исследовании для одновременного определения частотных характеристик авроральных процессов на разных высотах. Предложенный исследовательский подход, с помощью которого можно использовать экспериментальные данные для получения пространственно-временных характеристик физических процессов одновременно для разных высот, может быть в будущем применен как при обработке спутниковых измерений, так и лабораторных результатов по целенаправленному моделированию аврорального излучения [Bingham et al., 2013; Викторов и др., 2013; Shalashov et al., 2017].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен подход к анализу процессов в авроральной области магнитосферы Земли, базирующийся на обработке АКР с использованием вейвлет-преобразования. Эффективность такого подхода показана на примере излучений, зарегистрированных на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в эксперименте ПОЛЬРАД. Найдено, что спектр флуктуаций АКР изменяется при уменьшении высоты источника – на верхней границе (~6000 км) спектр носит степенной характер, т.е. интенсивность флуктуаций быстро убывает с уменьшением характерного времени. По мере понижения источника АКР спектр становится все более и более пологим, а на нижней границе (~2500 км) становится почти плоским – распределение интенсивности флуктуаций распределено равномерно по всем характерным масштабам. Такая трансформация спектра указывает на нелинейные процессы в источнике АКР. Физические механизмы этих процессов будут предметом наших дальнейших исследований.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность рецензентам, замечания которых стимулировали существенное улучшение статьи.

ФИНИНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 18-29-21037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Тарасов А.Ф.* Результаты измерений интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц при помощи аппаратуры, установленной на спутнике “ЭЛЕКТРОН-2” // Исследования космического пространства. Ред. Г.А. Скудрин. М.: Наука, С. 581–606. 1965.
- *Буринская Т.М., Рош Ж.Л.* Волноводный режим циклотронной мазерной неустойчивости в областях плазмы с пониженной плотностью // Физика плазмы. Т. 33. № 1. С. 28–37. 2007.
- *Викторов М.Е., Голубев С.В., Господчиков Е.Д., Изотов И.В., Мансфельд Д.А., Шалашов А.Г.* О механизме потерь энергичных электронов из открытой магнитной ловушки на начальной стадии ЭЦР-разряда // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 56. № 4. С. 240–253. 2013.
- *Галеев А.А., Гальперин Ю.И., Зеленый Л.М.* Проект “ИНТЕРБОЛ” по исследованиям в области солнечной земной физики // Космич. исслед. Т. 34. № 4. С. 339–362. 1996.
- *Головчанская И.В., Козелов Б.В., Дэспирак И.В.* Исследование широкополосной ELF турбулентности по данным спутника FAST // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 4. С. 501–509. 2012.
- *Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А.* Вейвлеты и их использование // УФН. Т. 171 С. 465–501. 2001.
- *Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 671 с. 2005.
- *Могилевский М.М., Романцова Т.В., Ханаиш Я., Буринская Т.М., Шрайбер Р.* Об источнике аврорального километрового излучения // Письма в ЖЭТФ. Т. 86. Вып. 11. С. 819–821. 2007.
- *Моисеенко И.Л., Могилевский М.М., Романцова Т.В.* Барстерная структура аврорального километрового излучения // ДАН. Т. 450. № 5. С. 530. 2013.
- *Ханаиш Я., Кравчик З., Могилевский М.М.* Наблюдение аврорального километрового излучения на спутнике ИНТЕРБОЛ-2: эксперимент ПОЛЬРАД // Космич. исслед. Т. 36. № 6. С. 617–629. 1998.
- *Чернышов А.А., Могилевский М.М., Козелов Б.В.* Фрактальный подход к описанию авроральной области // Физика плазмы. Т. 39. № 7. С. 636–646. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0367292113060024>
- *Alexander J.K., Kaiser M.L.* Terrestrial kilometric radiation: 1. Spatial structure studies // J. Geophys. Res. V. 81. № 34. P. 5948–5956. 1976. <https://doi.org/10.1029/JA081i034p05948>
- *Benson R.F., Calvert W., Klumpar D.* Simultaneous wave and particle observations in the auroral kilometric source region // Geophys. Res. Lett. V. 7. P. 959. 1980. <https://doi.org/10.1029/GL007i011p00959>
- *Bingham R., Speirs D., Kellett B., Vorgul I., McConville S.L., Cairns R.A., Cross A.W., Phelps A.D.R., Ronald K.* Laboratory astrophysics: Investigation of planetary and astrophysical maser emission // Space Sci. Rev. V. 178. P. 695–713. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9963-z>
- *Burinskaya T.M., Rauch J.-L.* Auroral kilometric radiation from a nonstationary thin plasma cavity // Ann. Geophys. V. 30. P. 1093–1097. 2012. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1093-2012>
- *Calvert W.* The auroral plasma cavity // Geophys. Res. Lett. V. 8. № 8. P. 919–921. 1981. <https://doi.org/10.1029/GL008i008p00919>
- *Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Kozelov B.V.* Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in the auroral zone // J. Geophys. Res. V.118. № 7. P. 4108–4118. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50321>
- *Chernyshov A.A., Kozelov B.V., Mogilevsky M.M.* Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // J. Atmos. Sol-Terr. Phys. V. 161. P. 127–133. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.013>
- *Daubechies I.* Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: SIAM. 353 p. 1992. <https://doi.org/10.1137/1.9781611970104>
- *Golovchanskaya I.V., Ostapenko A.A., Kozelov B.V.* Relationship between the high-latitude electric and magnetic turbulence and the Birkeland field-aligned currents // J. Geophys. Res. V. 111. P. A12301. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006JA011835>
- *Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V., Sergienk, T.I., Brändström U., Nilsson H., Sandahl I.* Scaling behavior of auroral

- luminosity fluctuations observed by Auroral Large Imaging System (ALIS) // *J. Geophys. Res.* V.113. A10. A10303. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013217>
- *Gurnett D.A.* The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* V. 79. № 28. P. 4227–4238. 1974.
<https://doi.org/10.1029/JA079i028p04227>
- *Kozelov B.V., Golovchanskaya I.V., Ostapenko A.A., Fedorenko Y.V.* Wavelet analysis of high-latitude electric and magnetic fluctuations observed by the Dynamic Explorer 2 satellite // *J. Geophys. Res.* V.113. P. A03308. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012575>
- *Kozelov B.V., Golovchanskaya I.V.* Derivation of aurora scaling parameters from groundbased imaging observations: Numerical tests // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A02204. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014484>
- *Kurth W.S., Baumbach M.M., Gurnett D.A.* Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* V. 80. № 19. P. 2764–2770. 1975.
<https://doi.org/10.1029/JA080i019p02764>
- *Lund E.J.* On the dissipation scale of broadband ELF waves in the auroral region // *J. Geophys. Res.* 115. A01201. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014545>
- *Milovanov A.V., Zelenyi L.M., Zimbardo G.* Fractal structures and power law spectra in the distant Earth’s magnetotail // *J. Geophys. Res.* V.101. № A9. P. 19903–19910. 1996.
<https://doi.org/10.1029/96JA01562>
- *Shalashov A.G., Viktorov M.E., Mansfeld D.A., Golubev S.V.* Kinetic instabilities in a mirror-confined plasma sustained by high-power microwave radiation // *Phys. Plasmas.* V.24. Iss. 3. P.032111. 2017.
<https://doi.org/10.1063/1.4964161>
- *Tam S.W.Y., Chang T., Kintner P.M., Klatt E.* Intermittency analyses on the SIERRA measurements of the electric field fluctuations in the auroral zone // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L05109. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021445>
- *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* V. 79. P. 61–78. 1998.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
- *Uritsky V.M., Klimas A.J., Vassiliadis D., Chua D., Parks G.* Scale-free statistics of spatiotemporal auroral emissions as depicted by POLAR UVI images: Dynamic magnetosphere is an avalanching system // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A12. P. 1426. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000281>
- *Voots G.R., Gurnett D.A., Akasofu S.-I.* Auroral kilometric radiation as an indicator of auroral magnetic disturbances // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 16. P. 2259–2266. 1977.
<https://doi.org/10.1029/JA082i016p02259>
- *Wu C.S., Lee L.C.* A Theory of the terrestrial kilometric radiation // *Astrophys. J.* V. 230. P. 621–626. 1979.
<https://doi.org/10.1086/157120>
- *Zarka P.* Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories // *J. Geophys. Res.* V. 103. № E9. P. 20.159–20.194. 1998.
<https://doi.org/10.1029/98JE01323>