

УДК 550.385.37

## АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ ПОЛЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДИАПАЗОНА $Pc1$ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

© 2021 г. А. В. Петленко\*

Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма ионосферы  
и распространения радиоволн РАН (СПбФ ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: petlenko.58@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 31.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Понятие “мгновенной” поляризации горизонтальной электрической компоненты поля пульсаций  $Pc1$ , измеренных береговыми и базовыми (отнесенными от берега) теллурическими линиями, используется для разделения вкладов геомагнитных пульсаций и сторонних шумов, причиной возбуждения которых являются возможное изменение концентрации морских аэрозолей в приземном слое атмосферы и изменения ветровой обстановки. Построение и практическое использование “векторов” мгновенной поляризации осуществляется в соответствии с основными принципами теории сложности и обеспечивает разделение вкладов шумов различной природы и оценку уровней их интенсивности. Показано, что периоды следования выделенных импульсных всплесков геомагнитных пульсаций  $Pc1$  согласованы с периодами геомагнитных колебаний диапазона  $Pc4$ – $Pc5$ .

DOI: 10.31857/S0016794021020115

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения теллурических полей в диапазоне пульсаций  $Pc1$  в прибрежной зоне искажены влиянием сторонних шумов. В работе [Корутенко et al., 2018] показано, что спектральный состав шумов, фиксируемых измерительными линиями вблизи уреза воды, отличается от спектра шумов на удаленных от берега (базовых) линиях, и эти различия связаны с возможным изменением концентрации морских аэрозолей в приземном слое атмосферы [Ивлев, 1982; Ивлев и Довгалюк, 1999] и изменениями ветровой обстановки. На синхронные изменения давления акустических гравитационных волн в приземном слое атмосферы и напряженности электрического поля указывают также Soloviev et al. [2017]. Изменения силы и направления ветра продолжительностью от первых десятков секунд до нескольких минут могут вызывать появление дискретных элементов в виде тонов нарастающей, убывающей и постоянной частоты в динамических спектрах электрических компонент поля, наблюдаемых на фоне геомагнитных пульсаций диапазона  $Pc1$ .

Спектральный состав геомагнитных пульсаций на береговых и базовых линиях более однороден, однако влияние проводимости земной коры на распределение поля  $Pc1$  трудно оценить, не устранив влияния сторонних (квазиэлектроста-

тических атмосферных) шумов. Сопоставление динамических спектров электрических компонент поля, измеренных береговыми и базовыми линиями, показывает лишь приблизительное отношение уровней ионосферных и сторонних шумов. Причина этого – интегральное представление функции спектральной плотности – каждая гармоника “мгновенного” спектра представлена одним амплитудным и одним фазовым значениями, для нахождения которых используется достаточно продолжительная выборка. Для высоких частот на выборках такого объема в результате применения полосовой фильтрации обнаруживаются амплитудные и фазовые изменения, неразличимые на последовательности мгновенных спектров, выборки которых смещаются с лагом, значительно превышающим не только дискретность данных, но и период пульсаций.

Амплитудно-фазовые изменения в фильтрованных в узкой полосе компонентах поля пульсаций могут быть выражены параметрами серии импульсных воздействий [Петленко, 1994а, б]. Неопределенность момента появления и фазы импульсного отклика фильтрованной компоненты снимается путем использования близких по частоте равнополосных фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) одинаковой длины. Коррелированность амплитудных огиба-

ющих компонент, фильтрованных в разных частотных каналах, указывает на синхронность импульсов. Нарушение корреляции может свидетельствовать о том, что локальный экстремум огибающей обусловлен вкладами нескольких импульсов. Сопоставление фильтрованных компонент поля, измеренных градиентными (близкорасположенными) линиями, позволяет установить наличие сторонних шумов, но выяснение структуры этих шумов, требующее анализа так называемых долговременных корреляций [Tsallis, 2009], при небольшом  $\leq 10$  числе частотных каналов затруднительно.

Анализ шумов горизонтальной электрической компоненты поля  $Pc1$  произведем, используя элементы теории сложности [Николис и Пригожин, 1990]. Используем естественную связность компонент поля — вектор поляризации как “мгновенную” характеристику моментов появления импульсов в фильтрованных ортогональных компонентах, фиксируемых каждой из градиентных линий. В отличие от известной [Уэйт, 1987] трактовки, предполагающей (в той, или иной мере) осредненную поляризацию возмущений электромагнитного поля, введем адаптированное к кратковременным импульсным воздействиям понятие мгновенной поляризации. В силу теоремы о стационарной фазе каждый “вектор” такой поляризации характеризует амплитуду и ориентацию поля импульсного воздействия, которые определяются вкладами теллурических полей, индуцированных геомагнитными пульсациями, и действием сторонних шумов.

Различия уровней и направлений поляризации шумов различной природы, с одной стороны, характеризуют сложность динамической системы, представленной серией импульсных возмущений и переходными процессами в каналах фильтрации. С другой — способствуют более эффективно разделению вкладов этих шумов. Вводя функции плотности импульсных всплесков, или квазистационарных состояний динамической системы на разных градиентных теллурических линиях, можно получить плотность распределения сторонних шумов во времени, оценить их уровень и направление поляризации.

Целью работы является определение долговременных корреляций (связности) между разными спектральными составляющими в структуре сторонних шумов и выявление соответствующих связей в спектрах геомагнитных пульсаций. Актуальность работы заключается в определении понятия мгновенной поляризации и его использовании для общей характеристики сложности измеренных векторных полей и практического решения прикладных задач.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Теллурические линии 1–3 на берегу Белого моря располагались на удалении  $\sim 300$  м друг от друга (нумерация с запада на восток). Линии 4 (базовые) смещены от береговых на  $\sim 350$ – $400$  м. Ортогональные линии длиной  $\sim 50$  м измеряли горизонтальные компоненты напряженности электрического поля с пороговой чувствительностью  $\leq 10^{-2}$  мкВ/м. Измерения электрических и магнитных полей велись с дискретностью 10 Гц в полосе частот 0.002–2.0 Гц. В работе представлены данные, полученные 16.07.2019 г. и 22.07.2019 г. в периоды слабой геомагнитной возмущенности. Для анализа шумов в диапазоне геомагнитных пульсаций  $Pc1$  (0.5–1.5 Гц) использованы 10 равнополосных ( $\Delta f \sim 0.1 \pm 0.005$  Гц) КИХ фильтров равной длины ( $L = 40$ ), периоды фильтрации которых  $T_k = (0.6 + 0.1k)$  с,  $k = 0 \dots 9$ , перекрывают указанный диапазон. Подавление шумов в полосах заграждения — 40 дБ. Фильтры КИХ синтезированы как оптимальные [Рабинер и Гоулд, 1978] с почти гауссовой амплитудно-частотной характеристикой (влияние отсечки гауссовых хвостов реальных фильтров  $\leq 5\%$ ). Процедура синтеза реализована в соответствии с основными положениями теории аппроксимации [Ахизер, 1965]. Сведением к задаче обращения Якоби [Новиков, 1999] результат синтеза приводится к решению в функциях, представляющему (как и гауссово в работе [Петленко, 1994б]) собственные функции преобразования Фурье. Метеорологическая обстановка контролировалась автоматической станцией AW006, фиксирующей изменения атмосферного давления, скорости и направления ветра с дискретизацией  $\sim 16$  с.

Для динамической системы, представленной полным комплектом фильтрованных данных, каждая из компонент является временным рядом, которому в терминах модели [Петленко, 1994а] может быть сопоставлено дифференциальное (регрессионное) соотношение, связывающее последовательность фильтрованных значений с параметрами импульсных откликов. Вид этих уравнений зависит от числа откликов  $n$ , порядок соответствующего уравнения  $2n$  соответствуют сложности рассматриваемой системы. Значение  $n$  не известно, но его можно оценить, сопоставляя амплитудные огибающие компонент поля в разных каналах фильтрации. Из работы [Петленко, 1994б] следует, что огибающая одиночного отклика на какой-то частоте слабо отличается от огибающей двух и более откликов, следующих с малым запаздыванием, но на разных частотах различия этих огибающих могут быть хорошо заметны.

Трудность разделения вкладов разных импульсных откликов возрастает, если они существенно различаются по амплитуде. Если всплес-

ки импульсов имеют различную физическую природу, то методы их выделения, основанные на использовании модели откликов, не гарантируют их успешного разделения по типу шумов. Однако, как показала практика разделения импульсных вкладов геомагнитных пульсаций типа  $Pi2$ , в разных компонентах поля это разделение осуществляется согласованным (связным) образом, что позволяет произвести локализацию ионосферных источников  $Pi2$  пульсаций [Петленко и др., 2011] по компонентным измерениям на градиентных станциях. Для разделенных импульсных составляющих роль связности играли найденные амплитудно-фазовые соотношения измеренных компонент – фактически соотношения поляризации. В диапазоне  $Pi2$ – $Pc4$  пульсаций распределение поляризации определяется распределением и интенсивностями продольных и индуцированных ими холловских токов [Петленко, 2019] и токов в земной коре, а изменения поляризации – тем, насколько согласованно (когерентно) меняются эти интенсивности.

Наиболее известные типы пульсаций диапазона  $Pc1$  принято связывать с усилением электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в экваториальной плоскости магнитосферы в окрестности плазмопаузы [Ермакова и др., 2019]. Фазовые характеристики волновых пакетов  $Pc1$ , на наш взгляд, недостаточно изучены, а распределения поляризации  $Pc1$  существенно искажены неоднородностями проводимости земной коры. Тем не менее, отношение поляризации, отображающее естественную связность компонент поля, позволяет разделять вклады импульсных всплесков, в том числе шумов различной природы. Но чтобы поляризацию можно было бы трактовать как характеристику импульсного воздействия, следует рассматривать ее как мгновенное, не осредненное во времени свойство случайного процесса, образованного фильтрованными компонентами поля.

Для построения мгновенной поляризации воспользуемся теоремой Паскаля, позволяющей определить коэффициенты квадратичной формы по координатам пяти точек плоскости. За эти координаты будем принимать каждые пять последовательных измерений в фильтрованных ортогональных компонентах поля. В случае гармонических колебаний в обеих компонентах уравнение 2-формы будет определять эллипс, и данное определение поляризации будет совпадать с классическим. Для реально измеренных компонент не всякая построенная таким образом кривая является эллипсом, что свидетельствует в пользу сделанного предположения об импульсных возмущениях шумов и наличии переходных процессов между (временно) установившимися формами колебаний, вызванных разными импульсами.

Наличие переходных процессов подразумевает также, что не всякий построенный указанным образом эллипс может характеризовать поляризацию импульсного возмущения. Если параметры эллипса, построенного по пяти последовательным измерениям поля, существенно отличаются от параметров эллипса, построенного по следующим пяти измерениям, то (по крайней мере) один из них вероятнее всего характеризует переходной процесс, а не поляризацию установившихся колебаний. При частоте дискретизации 10 Гц и частоте фильтрации 1 Гц прогноз габаритных параметров построенного эллипса должен с хорошей (5–10%) степенью точности выполняться хотя бы для пяти измерений поля, следующих за исходными. Отберем только эллипсы, удовлетворяющие прогностическому критерию, и будем называть этот критерий отбора условием стабильности.

Отбраковка эллипсов, не удовлетворяющих прогностическому критерию, является необходимым, но не достаточным условием отнесения их к множеству эллипсов поляризации. Если большая полуось эллипса  $a$  существенно (за пределами точности) превышает величину модуля полной горизонтальной компоненты измеренного электрического поля, то данный эллипс, по-видимому, тоже характеризует переходной процесс и подлежит отбраковке. Этот критерий отбора назовем условием достоверности. Эллипсом мгновенной поляризации назовем эллипс, построенный по пяти последовательным измерениям поля и удовлетворяющий условиям стабильности и достоверности.

По пяти последовательно измеренным значениям поля эллипс мгновенной поляризации восстанавливается однозначно, его габаритные параметры (длины полуосей), параметры сдвига и угол поворота определяются с машинной степенью точности. Интервал времени, необходимый для построения эллипса, одинаков для всех каналов фильтрации, поэтому каждому из построенных эллипсов можно приписать определенный момент времени, которому соответствуют найденные параметры. Тем самым, раскрывается смысл термина “мгновенной” поляризации, и достигается удобство ее сопоставления на разных частотах. Чтобы облегчить интерпретацию результатов сопоставления, рассмотрим вспомогательные функции.

Для каждого канала фильтрации моменту мгновенной поляризации поставим в соответствие значение  $a$  большой полуоси эллипса (в единицах измерения напряженности поля). Значения  $a$  отбракованных эллипсов будем полагать нулевыми. Введем функцию распределения плотности  $\varphi$  ненулевых  $a$  значений на выборке для каждой частоты фильтрации. Также как и  $a(t)$

функции  $\varphi(t)$  являются обобщенными и (не более чем) кусочно-непрерывными. В отличие от функций  $a(t)$  вид  $\varphi(t)$  не зависит от конкретных значений длин осей  $a$  эллипсов поляризации (амплитуд фильтрованных компонент), но зависит от размера окна биннинга [Pavlos et al., 2012] — выборки, по которой оценивается плотность. При подходящем размере окна функции  $\varphi(t)$  становятся достаточно гладкими, что позволяет находить долговременные корреляции плотности  $\varphi_{T_k}$  ненулевых  $a$  значений в разных каналах фильтрации и применять градиентные методы сопоставления плотностей  $\varphi_{T_k}^j$ , построенных для измерений поля разными линиями. Далее приводятся результаты анализа шумов горизонтальной электрической компоненты поля в диапазоне  $Pc1$  пульсаций, выполненного с использованием определенных выше обобщенных функций.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На верхней панели рис. 1а показана функция значений, построенных для станции 1 и фильтра  $T_0 = 1.5$  с за период 22.07.2019 г. в интервале 00:01–00:16 UT. Три расположенных ниже панели демонстрируют изменения функции плотности  $\varphi_{1.5}^1$  ненулевых значений  $a$  в зависимости от размера окна биннинга. Ультракороткая выборка ( $n = 3$ ) соответствует построению плотности как обобщенной функции, значения которой синхронизованы со значениями функции  $a(t)$ . Ниже представлена функция  $\varphi$ , рассчитанная для  $n = 100$ . Размер окна биннинга 300 (нижняя панель рис. 1а) соответствует половине объема выборки, по которым рассчитывались функции плотности динамических спектров горизонтальных электрических компонент поля  $E_x$  и  $E_y$ . Построенные функции позволяют контролировать характерные периоды “интенсификации”  $a$  значений, соответствующие периодам геомагнитных пульсаций  $Pc4$ – $Pc5$  и стационарность распределения этих интенсификаций в пределах указанных периодов.

Дискретность представления функции  $\varphi_{1.5}^1$  совпадает с дискретностью измерений поля 0.1 с и значительно превышает дискретность представления динамических спектров 2.5 с, отмеченную ромбиками на верхней панели рис. 1б. Вторая сверху панель на рисунке отображает плотность  $\varphi_{1.5}^4$  ненулевых значений  $a$  линий 4 в той же полосе частот (ниже показана соответствующая ей функция  $a(t)$ ). Нормированные на общее число ненулевых — значений функции  $\varphi_{1.5}^1$  и  $\varphi_{1.5}^4$  сопоставляются как градиентные измерения поля.

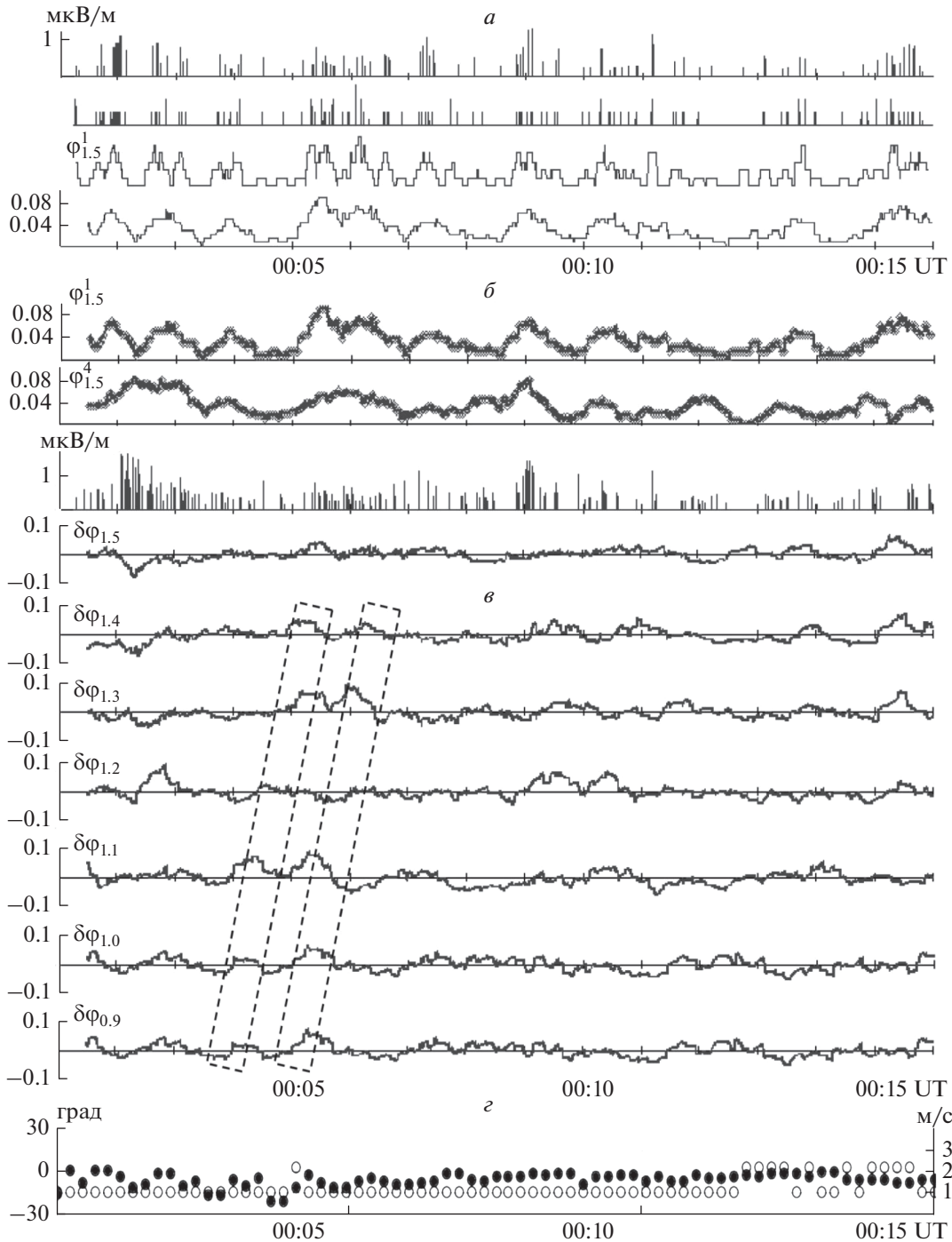
На нижней панели рис. 1б представлена разностная функция  $\delta\varphi_{1.5}^{1,4}$  береговой и базовой станций. Можно заметить, что влияние пульсаций  $Pc4$ – $Pc5$  на поведение  $\delta\varphi_{1.5}^{1,4}$  в значительной мере подавлено, то есть разностная функция плотности в большей степени характеризует распределение сторонних шумов. Сопоставление разностных функций плотности, построенных в диапазоне периодов 0.9–1.4 с (рис. 1в) позволяет выявить долговременные корреляции разных спектральных составляющих этих шумов — схематично показаны прямоугольниками со штриховой границей — реально моменты появления особенностей  $\delta\varphi_{T_k}^{1,4}$  в зависимости от  $T_k$  скорее пропорциональны  $(T_k - T_0)^{-1}$ .

Возрастание периода сторонних шумов с 0.9 до 1.4 с на рис. 1в реализуется за  $\sim 70$ – $90$  с, что позволяет идентифицировать их как ветровую помеху.

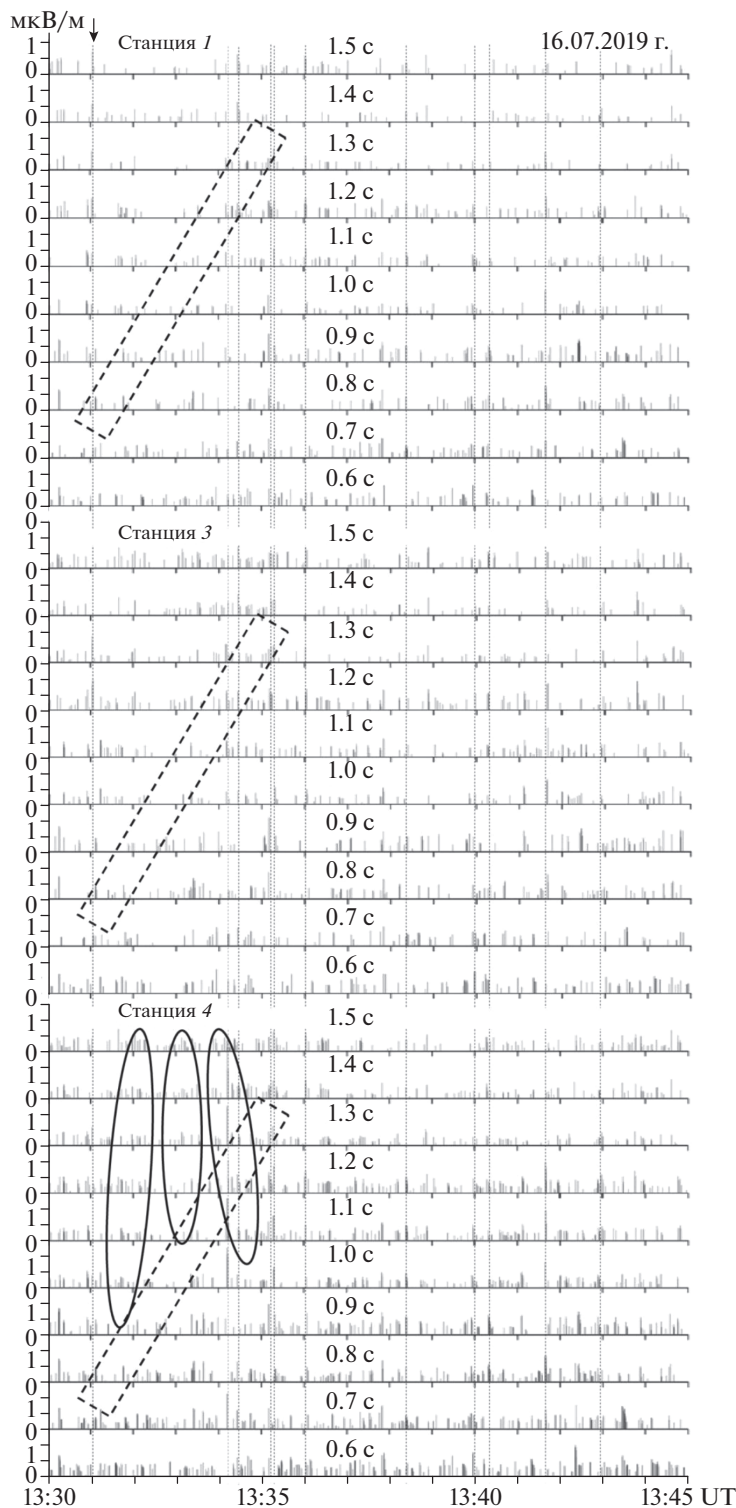
Изменения  $\delta\varphi_{1.0}^{1,4}$  на рис. 1в соответствуют изменениям направления ветра в секторе  $330^\circ$ – $360^\circ$  на рис. 1г. Зависимость от изменений скорости ветра  $\sim 1$ – $2$  м/с и атмосферного давления (постоянного  $\sim 1200$  гПа на всем интервале времени) менее очевидна. Повторяемость всплесков шумов с периодами 5–10 с соответствует характерным для акватории периодам волнения моря. Влияние этих возмущений в функциях плотности  $\varphi(t)$  на порядок ниже, чем влияние геомагнитных пульсаций. Поэтому, как видно из представленных распределений  $a(t)$ , уровень пульсаций составляет  $\sim 1$  мкВ/м, а уровень сторонних шумов — менее 0.1 мкВ/м.

На рисунке 2 представлены распределения  $a(t)$  для разных частот, построенные для береговых 1, 3 и базовой станции 4 на интервале 16.07.2019 г. в 13:30–13:45 UT. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты синхронного проявления мгновенной поляризации на разных частотах в разных измерительных линиях. Значительное увеличение модуля горизонтальной составляющей электрической компоненты на этом интервале достигается на фильтрах 1–1.5 с в 13:34:12.5–13.0 UT. Для фильтра  $T_1 = 1.4$  с в линиях 4 поляризация наблюдается с запаздыванием 0.5 с относительно момента ее формирования на фильтре  $T_8 = 0.7$  с. Величина запаздывания соответствует длительности интервала времени, необходимого для определения параметров эллипса. Синхронные проявления поляризации наблюдаются с периодами  $Pc4$  ( $T \sim 115$  с) и  $Pc5$  ( $T \sim 260$  с) также как и на рис. 1.

Вычисляя градиенты плотности  $\delta\varphi_{T_k}^{1,4}$  и  $\delta\varphi_{T_k}^{3,4}$  (на рис. 2 не показаны), выделим на интервале 13:31–13:36 UT долговременные корреляции  $\varphi_{T_k}$



**Рис. 1.** (а) – Сверху вниз – распределение  $a(t)$  в полосе с  $T_0 = 1.5$  с (теллурическая линия) 22.07.2019 00:01–00:16 UT; ниже функции плотности  $\phi_{1.5}^1(t)$  для разных окон биннинга –  $n = 3$ ,  $n = 100$  и  $n = 300$ ; (б) – плотности  $\phi_{1.5}^1(t)$  и  $\phi_{1.5}^4(t)$  – окно биннинга  $n = 300$  (ромбиками показаны центры спектральных выборок); ниже распределение  $a(t)$  для теллурической линии 4 и разностная функция  $\delta\phi_{1.5}^4(t)$ ; (в) – также сверху вниз – разностные функции плотности  $\delta\phi_{T_k}^4(t)$  ( $k = 1, \dots, 6$ )  $T_1 = 1.4$  с, ...  $T_6 = 0.9$  с. Прямоугольниками со штриховой границей схематично выделена долговременная корреляция сторонних шумов. Плотности  $\phi_{T_k}^1(t)$  и  $\phi_{T_k}^4(t)$  нормированы. (г) – изменения направления (темные) и скорости (светлые кружки) ветра.



**Рис. 2.** Распределение  $a(t)$  по разным теллурическим линиям и разным каналам фильтрации. Стрелкой отмечен момент фиксации вектора поляризации в канале  $T_1 = 1.4$  с в линиях 4, задержанный на 0.5 с относительно момента его фиксации в канале  $T_8 = 0.7$  с. Видно, что уровни ненормированных (наблюдаемых) плотностей поляризации находятся в отношении  $\hat{\varphi}_{T_k}^4 > \hat{\varphi}_{T_k}^3 > \hat{\varphi}_{T_k}^1$ . Нормировкой достигается выравнивание уровней  $\hat{\varphi}_{T_k}^i$  и возможность построения долговременной корреляции сторонних шумов (схематично показана прямоугольниками со штриховой границей аналогично рис. 1). Вертикальные штриховые линии отмечают  $Pc4$ – $Pc5$  периодичность импульсных интенсификаций геомагнитных пульсаций  $Pc1$ . Некоторые из таких интенсификаций в линии 4 отмечены овалами.

в полосе  $T_k$  0.8–1.3 с (также схематично показаны прямоугольниками). Коррелируя разностные функции  $\delta\varphi_{T_k}^{i,4}$  и плотности  $\varphi_{T_k}^4$ , найдем для линий 4 отношение вкладов геомагнитных пульсаций и сторонней помехи  $\sim 4.3 : 1$ . Для береговых линий 3 и 1 эти отношения существенно ниже, соответственно  $\sim 1.8 : 1$  и  $\sim 1.3 : 1$ . Плотности геомагнитных пульсаций в полосе  $T_k$  1–1.5 с хорошо коррелируют между собой с небольшими запаздываниями, при этом значения функций  $a(t)$  для низких частот больше, чем для высоких. На рисунке 2 периоды интенсификации геомагнитных пульсаций в частотных каналах линий 4 схематически выделены овалами.

Моменты появления эллипсов, отображающие импульсные возмущения электрических компонент поля на береговых и базовой линиях, не синхронизованы, а плотность их распределения на выборке у береговых линий ниже, чем у базовой. Причина такого поведения функций плотности в том, что импульсные всплески геомагнитных пульсаций на базовой станции хорошо коррелированы и менее подвержены влиянию сторонней помехи. Для береговых станций присутствие сторонних шумов приводит к большей плотности переходных процессов и большему числу отбраковок эллипсов по условию стабильности. Такое объяснение хорошо подтверждается поляризационными диаграммами, отображающими распределение значений  $a$  по мгновенным значениям углов поворота  $\phi$  эллипса (направлениям поляризации) на выборках короткой длины.

На рисунке 3 представлены векторы поляризации, построенные по минутным выборкам измерений поля на станциях 1, 3 и 4. Вершины векторов, построенных для разных полос фильтрации, по-разному маркированы. На базовой станции пучок векторов слабо расходится по направлениям поляризации, тогда как у береговых – разброс направлений существенно больше. Вклады сторонних шумов искажают направления поляризации геомагнитных пульсаций. Различия направлений поляризации на станциях 1, 4 и станции 3 показывают также, что распределения проводимости земной коры в окрестностях этих станций различны.

Сопоставление поляризационных диаграмм для разных станций и разных моментов времени позволяет оценить мгновенные изменения уровня и направления прихода возмущений сторонних шумов. Показана возможность разделения вкладов сторонних шумов и геомагнитных пульсаций рис. 1 и 2, основанная на нахождении долговременных корреляций функций плотности. Заметим, что функции  $\varphi_{T_k}$  ведут себя как изменения функций спектральной плотности на фиксированной частоте, а построенные на рис. 2 рас-

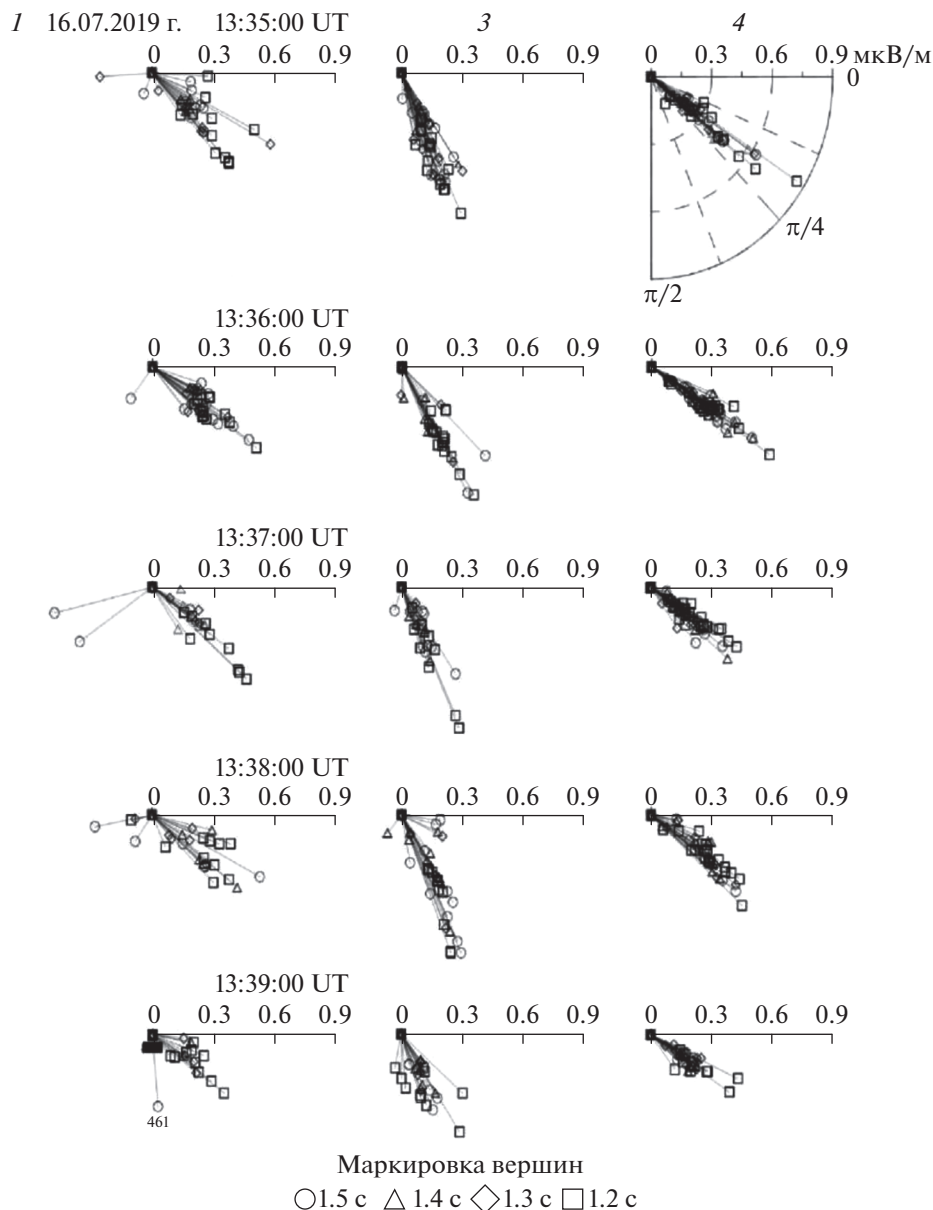
пределения  $a(t)$  – как динамические спектры компонент поля.

На рисунке 4 показаны динамические спектры  $E_x$ -компоненты, измеренной линиями 1, 3 и 4 в период 13:00–14:00 UT 16.07.2019 г. Под каждым спектром приведена волновая форма сигнала. Из рисунка 4 видно, что магнитосферно-ионосферные пульсации в диапазоне  $Pc1$  являются продолжением в область верхних частот более длиннопериодных пульсаций (с периодами пульсаций  $Pc3$ ), всплески которых модулируются периодами  $Pc4$ – $Pc5$ . Серии таких всплесков отмечены овалами на рис. 2. Долговременные корреляции плотности  $\varphi_k$  на спектрах рис. 4 имеют вид понижающихся тонов, один из которых (отмечен прямоугольниками со штриховой границей) соответствует выделенной корреляции на рис. 2. Шумы, почти линейно убывающие с частотой, на рис. 1 ассоциировались с ветровой помехой и многократно наблюдались в более детализированных динамических спектрах (подобных спектрам на рис. 4), чем представленные в работе [Корутенко et al., 2018].

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мгновенные спектры, образующие динамический спектр электрических компонент поля в диапазоне  $Pc1$ , представительнее набора полосовых фильтров в частотной области (на рис. 4 частоты фильтрации показаны горизонтальными штриховыми линиями). Однако на фиксированной гармонике связанные (коррелированные) интенсификации шумов во временной области проявляются с разрешением, уступающим дискретности представления распределений  $a(t)$  и функций плотности  $\varphi(t)$  ненулевых – значений. При построении  $a(t)$  подразумевается естественная связность ортогональных компонент, по пяти измерениям которых за период колебаний поля решается система пяти линейных уравнений с пятью неизвестными. Характеристическое уравнение этой системы – уравнение 5-й степени. Поэтому решение системы чувствительно по отношению к малым возмущениям поля и хорошо реагирует на изменения режима установившихся колебаний, в частности на начало переходных процессов, вызванных импульсными всплесками сторонних шумов.

При наличии сторонних шумов анализ поля геомагнитных пульсаций усложняется – корреляционные связи шумовых составляющих могут включать в себя взаимное влияние шумов различной физической природы. Рассмотрим поляризацию измеренных полей, используя основные понятия теории сложности [Николис и Пригожин, 1990]. На поляризационных диаграммах, постро-



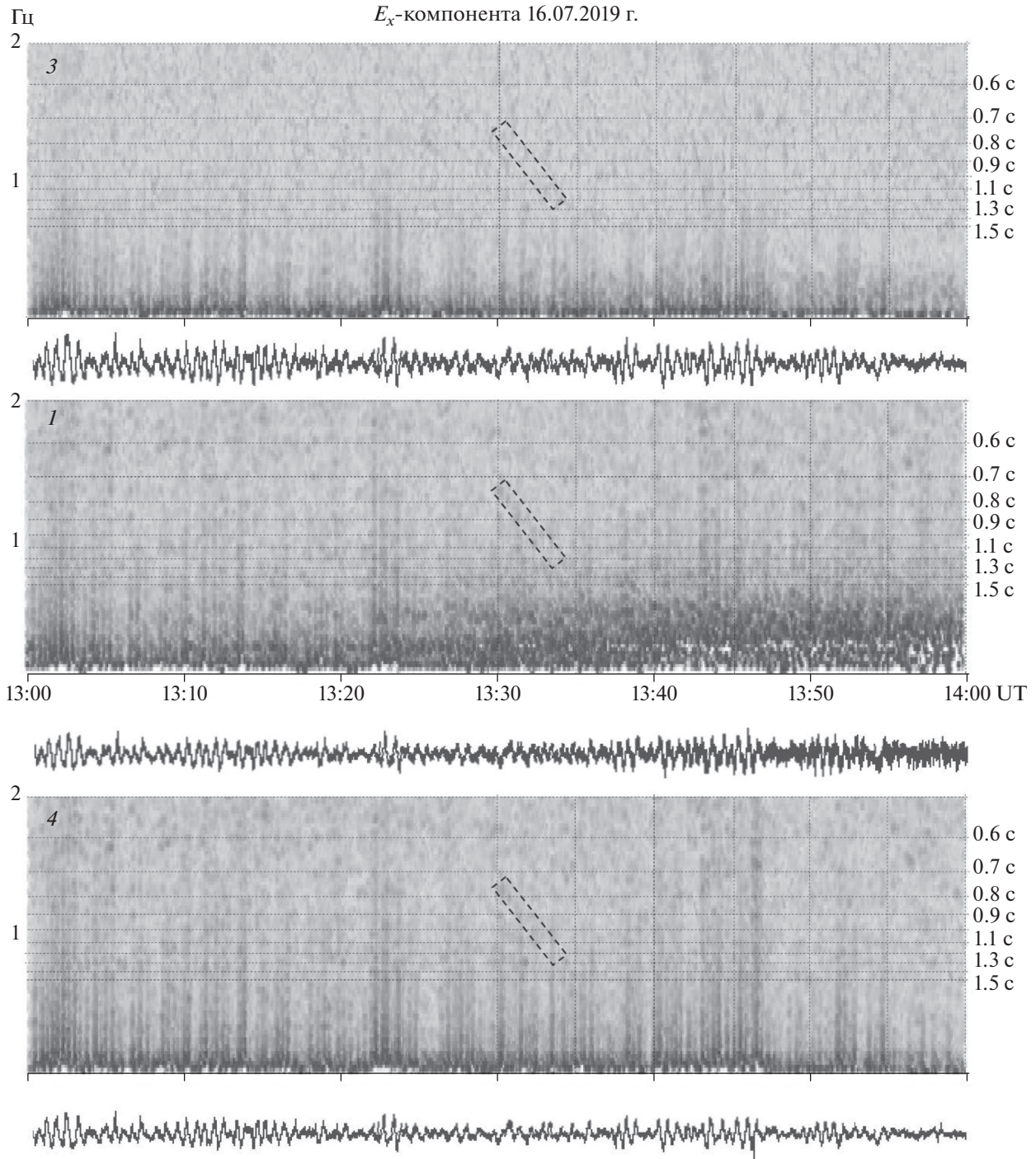
**Рис. 3.** Поляризационные диаграммы – распределения значений по направлениям поляризации, построенные для пяти минутных интервалов в период 16.07.2019 г. 13:39–13:40 UT для станций 1, 3, 4 и разных полос фильтрации: вершины векторов, обозначенные кружками –  $T_0 = 1.5$  с; треугольниками – 1.4 с; ромбиками – 1.3 с; квадратиками – 1.2 с. Для выборки 13:34–13:35 UT (станция 1) указан момент появления вектора поляризации 13:39:46.1 UT в канале  $T_0 = 1.5$  с.

енных для выборочных интервалов фиксированной длины (рис. 3), выделим только векторы, относящиеся к одному из каналов фильтрации. отождествим плоскость поляризации с экземпляром комплексной плоскости так, что пучок векторов образует на этой плоскости так называемое звездное множество [Лаврентьев и Шабат, 1987]. Взаимные корреляции таких множеств реализуются посредством отображений соответствующих экземпляров на подходящую область комплексной плоскости (например, внутренность, или внешность диска) [Efendiev and Wend-

land, 1996]. Такие отображения связаны с интегралом Шварца-Кристоффеля. Ядро интеграла представляет собой многочлен, степень которого определяется мощностью множества векторов поляризации и характеризует сложность динамической системы, образованной измерениями поля.

Отметим принципиальный момент, связанный с сопоставлением выборок, характеризующихся разными значениями наблюдаемой плотности  $\hat{\phi}_{T_k}^j$ . В силу представлений [Гленсдорф и Пригожин, 1973] сложность измерений определяется наиболее высокой плотностью векторов





**Рис. 4.** Динамические спектры и волновые формы  $E_x$ -компоненты поля в диапазоне  $Pc1$ , измеренной теллурическими линиями 3, 1, 4 в период 16.07.2019 г. 13:00–14:00 UT. Горизонтальными пунктирными линиями показаны частоты фильтрации. Прямоугольники со штриховой границей отмечают понижающийся тон, вызванный всплесками сторонних шумов и соответствующий долговременной корреляции, выделенной на рис. 2 в период 13:31–13:36 UT. Всплески геомагнитных пульсаций  $Pc1$  подчинены периодичности пульсаций  $Pc4$ – $Pc5$ .

мгновенной поляризации. Превышение плотности  $\hat{\phi}_{T_k}^4$  над  $\hat{\phi}_{T_k}^1$  в приведенных на рис. 2 распределениях  $a(t)$  не означает, что сложность измерений поля базовыми линиями 4 выше. Она одина-

кова для всех измерений и в период 16.07.2019 г. в 13:30–13:45 UT определяется плотностью ненулевых значений в базовых линиях. Видимое снижение плотности  $\hat{\phi}_{T_k}^1$  и более значительный разброс

направлений поляризации в измерениях береговых линий объясняются различиями уровней сторонних шумов. На практике, превышение плотности  $\hat{\Phi}_{T_k}^4$  позволяет выделить периоды времени, когда сторонние шумы на береговых линиях не дают установиться колебаниям геомагнитных пульсаций и позволяют по разбросу направлений поляризации в эти периоды оценить уровень и поляризацию разных шумовых составляющих. Выравнивание уровней плотности достигается соответствующей нормировкой. Нормированные плотности  $\Phi_{T_k}^j$ , как видно из рис. 1, хорошо коррелируют друг с другом — их разности  $\delta\Phi_{T_k}^{1,4}$  флуктуируют вблизи нулевого значения.

С рассмотренных позиций изменение шумовой обстановки контролируется визуальным сопоставлением распределений  $a(t)$  и грубой оценкой значений наблюдаемой плотности  $\hat{\Phi}_{T_k}^j$ . Сопоставляя распределения  $a(t)$  (рис. 2) с динамическими спектрами и волновыми формами  $E_x$ -компоненты (рис. 4) линий 1 и 3 можно заметить: 1) заниженное на ~10% значение уровня наблюдаемой плотности  $\hat{\Phi}_{T_k}^1$  по сравнению с уровнем  $\hat{\Phi}_{T_k}^3$ ; 2) значительное увеличение шумов в линиях 1 во всей полосе частот (до 2 Гц) с 13:26 UT. Подобные усиления шумов на фазе прилива связаны с перколяционными процессами в прибрежном грунте и интенсификацией гальванических процессов на электродах измерительных линий.

Режим генерации геомагнитных пульсаций диапазона Pc1 в пределах рассмотренных интервалов времени (рис. 1 и 2) соответствует представлению о серии синхронизованных в разных каналах фильтрации импульсных возмущений поля. Периоды следования импульсных всплесков Pc1 согласованы с периодами пульсаций диапазона Pc4–Pc5. Более детальные исследования связи этих пульсаций выходят за рамки данной работы. Однако представленные методы могут быть использованы при анализе поля геомагнитных пульсаций Pc1, характеризующихся более сложной спектральной структурой (например, колебаний с изменяющимся периодом), предполагающей наличие долговременных корреляций между разными гармоническими составляющими.

## 5. ВЫВОДЫ

Для разделения вкладов геомагнитных пульсаций Pc1 и сторонних шумов используются представления об импульсных возмущениях, формирующих наблюдаемые изменения электромагнитного поля, и понятие мгновенной поляризации, адаптированное к кратковременным импульсным воздействиям. Предложен способ по-

строения мгновенной поляризации и методы ее использования для выделения вкладов геомагнитных пульсаций, определены вспомогательные функции распределения и плотности поляризации, способствующие выявлению структуры шумов различной физической природы и оценке их уровней.

Показано, что введенные представления позволяют характеризовать регистрируемые изменения поля в рамках теории сложности, что сложность измеряемых полей является алгебраической характеристикой и может быть выражена в терминах функций распределения поляризации. На примере конкретных измерений поля производится разделение вкладов и оценка уровней электромагнитных шумов различной природы. Определяется структура и спектральный состав шумов. Показано, что периоды следования импульсных всплесков геомагнитных пульсаций Pc1 контролируются периодами пульсаций диапазона Pc4–Pc5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахизер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. М.: Наука. 408 с. 1965.
- Гленддорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций М.: Мир. 280 с. 1973.
- Ермакова Е.Н., Демехов А.Г., Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Котик Д.С., Райта Т. Особенности динамики спектров многополосных пульсаций Pc1 при наличии множественных областей ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. № 1. С. 1–28. 2019.
- Ивлев Д.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей // Л.: Изд. ЛГУ, 366 с., 1982.
- Ивлев Д.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем // СПб: НИИХ, СПбГУ, 194 с., 1999.
- Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука. 688 с. 1987.
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир. 343 с. 1990.
- Новиков Д.П. Алгебро-геометрические решения уравнения Кричевера-Новикова // Теорет. и матем. физика. 1999. Т. 121. № 3. С. 367–373.
- Петленко А.В. Некоторые аспекты анализа поля геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 1. С. 131–133. 1994а.
- Петленко А.В. Спектральные характеристики модельного представления данных наблюдений геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 3. С. 72–79. 1994б.
- Петленко А.В., Копытенко Ю.А., Мартинес В.А., Пилипенко В.А., Исмаилов В.С. Тонкая структура геомагнитных пульсаций типа Pi2 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 5. С. 592–607. 2011.
- Петленко А.В. Особенности распределений холловских токов и магнитного поля пульсаций диапазона

*Pc4* // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 607–617. 2019.

– Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир. 848 с. 1978.

– Уэйт Дж.Р. Геоэлектромагнетизм. М.: Недра. 235 с. 1987.

– Efendiev M.A., Wendland W.L. Nonlinear Riemann-Hilbert problem for multiply connected domains // J. Nonlinear Analysis. Theory, Methods and Applications. V. 27. P. 37–58. 1996.

– Kopytenko Yu.A., Ismagilov V.S., Petrishchev M.S., Sergushin P.A., Petlenko A.V. Broadband ULF perturbations of

the electric field in coastal zone of the Okhotsk sea // Physics of Auroral Phenomena. V. 41. № 1. P. 58–60. 2018.

– Pavlos G.P., Karakatsanis L.P., Xenakis M.N. Tsallis non-extensive statistics, intermittent turbulence, SOC and chaos in the solar plasma, Part one: Sunspot dynamics // Physica A. V. 391. P. 6287–6319. 2012.

– Soloviev S.P., Rybnov Yu.S., Kharlamov V.A., Krasheninnikov A.V. Acoustic gravity waves and the atmospheric electric field perturbations accompanying them. // Geomagnetism and aeronomy. V. 57. № 3. P. 335–346. 2017.

– Tsallis C. Introduction to Non-extensive Statistical Mechanics. Springer. 382 p. 2009.