

УДК 523.31-854+533.951.7+520.64-14

ФЛУКТУАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ MMS

© 2024 г. И.Л. Овчинников^{1,*}, Д.Ю. Найко^{1,2}, Е.Е. Антонова^{1,3}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*ilya@psn.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 02.05.2023 г.

Проведен статистический анализ спектров флуктуаций электрического и магнитного поля в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным спутников миссии *Multiscale Magnetosphere Mission (MMS)* за 2017–2022 гг. при небольших скоростях движения плазмы. Рассмотрены результаты измерений комплекса аппаратуры FIELDS. Выделены трехчасовые интервалы, во время которых спутники находились внутри плазменного слоя и плазменный параметр β был больше единицы. Проведен анализ более ста тысяч спектров флуктуаций электрического поля прибором EDP/DCE и магнитного поля прибором FGM. Из рассмотрения были исключены интервалы со скоростями плазмы свыше 100 км/с. Для каждого интервала определены показатели наклонов спектров в частотном диапазоне 0.014–16 Гц. Выявлено, что величины показателей спектров существенно отличаются для электрического и магнитного поля. Получены зависимости показателей спектров от усредненных по интервалу уровней флуктуаций электрического и магнитного полей.

DOI: 10.31857/S0023420624010021

ВВЕДЕНИЕ

Характерная особенность процессов в магнитосфере Земли – существование турбулентных флуктуаций скорости, плотности, электрического и магнитного поля при бесстолкновительном характере плазменных взаимодействий. Поэтому определение характеристик бесстолкновительной магнитосферной турбулентности представляется важной составной частью исследований магнитосферы. Турбулентность необходимо учитывать при описании транспорта частиц из магнитослоя внутрь магнитосферы и утечки частиц из магнитосферы, переноса внутри магнитосферы, ускорения и нагрева частиц и при решении многих других проблем. Одной из них становится проблема формирования плазменного слоя при южной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) и его разрушения и заполнения плазмой долей хвоста при северной ориентации ММП (см. обзоры [2, 15] и ссылки в данных обзорах). Для решения последней задачи

существенный интерес представляют флуктуации электрического поля.

Количественные исследования турбулентности магнитосферного хвоста начались с анализа данных спутников *ISEE* и *Geotail* [1, 4, 5, 16 и др.] и продолжились при реализации проекта *CLUSTER* [24, 25 и др.]. Было доказано, что турбулентность хвоста имеет перемежающийся характер и уровень флуктуаций магнитного поля значительно возрастает при прохождении ускоренных плазменных потоков (*англ.* bursty bulk flow – BBF). Исследования бесстолкновительной турбулентности значительно расширились с реализацией миссии *MMS*, результаты измерений приборов которой находятся в открытом доступе на сайтах (<https://mms.gsfc.nasa.gov/>, <https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/data/>). В работе [22] подчеркивалось, что до реализации проекта *MMS* не удавалось получать надежные измерения трех компонент электрического поля с разрешением, необходимым для исследований процессов в хвосте магнитосферы.

Проект *MMS* был направлен на изучение плазменных процессов на электронных масштабах [6], но полученные данные использовались и продолжают использоваться при анализе различных плазменных процессов, включая исследования турбулентности. Данные *MMS*, наряду с возможностью изучения процессов на малых масштабах, позволяют исследовать флуктуации всех трех компонент электрического поля, приводящих к транспорту плазмы, ускорению и нагреву частиц.

Многочисленные исследования с использованием данных *MMS* посвящены турбулентности солнечного ветра [7, 12 и др.] и магнитослоя [18, 26 и др.]. Успешность таких исследований связана с высокой скоростью течения плазмы в солнечном ветре и в магнитослое на флангах магнитосферы, превышающей альвеновскую и звуковую скорость. При этом используется гипотеза Тейлора [21], в соответствии с которой скорость волн, формирующих турбулентный каскад, много меньше скорости движения плазмы, что позволяет определять волновые числа. Данное приближение неприменимо к изучению турбулентности плазмы в хвосте магнитосферы Земли, что значительно усложняет исследования турбулентности плазменного слоя, где происходит сдвиг спектра турбулентных флуктуаций по частоте в областях быстрых движений плазмы [27], так как при изучении турбулентности обычно рассматривается спектр по волновым числам. Однако в работе [8] отмечалось, что в условиях, когда скорость течения плазмы значительно изменяется, может быть получен только частотный спектр, и в дальнейших работах по изучению турбулентности при быстрых течениях плазмы определение наклонов частотных спектров по данным *MMS* успешно использовалось.

В ходе анализа спектров турбулентности по данным *MMS* основное внимание было сосредоточено на процессах с высоким уровнем турбулентных флуктуаций, что позволяло анализировать формирование турбулентного спектра в частотном диапазоне до 100 Гц [8, 9, 20 и др.] при анализе измерений в быстром режиме (*англ.* burst mode) с разрешением до 8000 с^{-1} . Данные с таким разрешением записываются и анализируются отдельно для каждого выделяемого события, и их трудно использовать для статистического анализа. Однако такой анализ можно проводить для большого массива постоянно записываемых данных с временным разрешением для магнитного поля до 16 с^{-1} и электрического поля до 32 с^{-1} . Принимая во внимание, что

к основным вопросам турбулентности в хвосте магнитосферы Земли относится проблема существования квазиравновесной конфигурации турбулентного хвоста в спокойных условиях [2, 15], такие исследования представляют несомненный интерес. Необходимо также отметить, что статистические исследования спектров турбулентности в хвосте магнитосферы Земли с использованием трех компонент измеряемого электрического поля ранее не проводились.

Цель настоящей работы заключается в изучении характеристик спектров турбулентных флуктуаций электрического и магнитного поля по данным *MMS* в областях, где скорость движения плазмы не превышает 100 км/с , и их зависимостей от усредненных амплитуд турбулентных флуктуаций.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для анализа использовались данные измерений комплекса аппаратуры FIELDS миссии *MMS* [22]: электрического поля EDP/DCE [13] с временным разрешением 32 с^{-1} и магнитного поля FGM [14] с временным разрешением 16 с^{-1} . Быстрая мода с разрешением до 8000 с^{-1} в нашем исследовании не использовалась. Локализация спутников внутри плазменного слоя фиксировалась по концентрации и температуре ионов плазмы, определяемым по данным приборов FPI/DIS [17]. Для выделения промежутков времени, когда космический аппарат находился внутри плазменного слоя, использовался критерий из работы [19] – координаты аппарата в системе GSM (*англ.* Geocentric Solar-Magnetosphere) удовлетворяют условиям: $X < -6R_E$, $|Y| < |X|$, $|Z| < 8R_E$, концентрация ионов плазмы $n_i > 0.1 \text{ см}^{-3}$, температура ионов $T_i > 0.5 \text{ кэВ}$, плазменный параметр $\beta > 1$. Использование критерия $\beta > 1$ выделяет области, заполненные горячей магнитосферной плазмой, в которых наблюдается значительное искажение магнитных силовых линий по сравнению с полем земного диполя. В рассмотренный диапазон входят части области кольцевого тока на геоцентрических расстояниях от 6 до $\sim(10-13) R_E$, где крупномасштабные поперечные токи замыкаются внутри магнитосферы, и области токов хвоста, в которых крупномасштабные токи замыкаются токами магнитопаузы.

Все параметры усреднялись по 6-минутным интервалам времени. За 2017–2022 гг. было выделено 29 тыс. 6-минутных интервалов, когда

в плазменном слое находился и передавал данные хотя бы один аппарат миссии *MMS*. Для предварительного анализа спектров было выбрано несколько трехчасовых интервалов непрерывного нахождения *MMS* в плазменном слое и методом Уэлча с использованием библиотеки SciPy получена спектральная плотность мощности (СПМ) флуктуаций компонент электрического поля в диапазоне частот от 6 мГц до 16 Гц и магнитного поля в диапазоне частот от 6 мГц до 8 Гц.

На рис. 1 показан пример анализа типичного интервала 14.VI.2017 в 01:00–04:00 UT. Во время измерений координаты спутников в системе координат GSM были: $X = -(22.6-22.1) R_E$, $Y = -(7.6-7.1) R_E$, $Z = (2.3-3.4) R_E$. На рис. 1а показаны параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитные индексы для данного события согласно базе данных OMNI с минутным разрешением: скорость солнечного

ветра была в пределах $v_{SW} = 471-505$ км/с, плотность $n_{SW} = 2.6-3.9$ см⁻³, давление $p_{SW} = 1.2-1.8$ нПа; компоненты межпланетного магнитного поля: $B_x^{IMF} = -(3.9-2.1)$ нТл, $B_y^{IMF} = -(1.6-3.1)$ нТл, $B_z^{IMF} = 3.5-2.7$ нТл; геомагнитные условия были спокойными: $Kp = 0-1^-$, $SUM-H = -(9-6)$ нТл, $AL = -(31-17)$ нТл.

На рис. 1б показаны флуктуации компонент магнитного и электрического поля со спутника *MMS-1*. Результаты измерений на других спутниках миссии *MMS* в данном случае практически не отличались. Из рис. 1б следует, что амплитуда флуктуаций электрического поля во время исследованного интервала колебалась в интервале от 0.5 до -0.6 мВ/м, исключая всплеск электрического поля до 1.7 мВ/м в области, где происходило кратковременное изменение знака

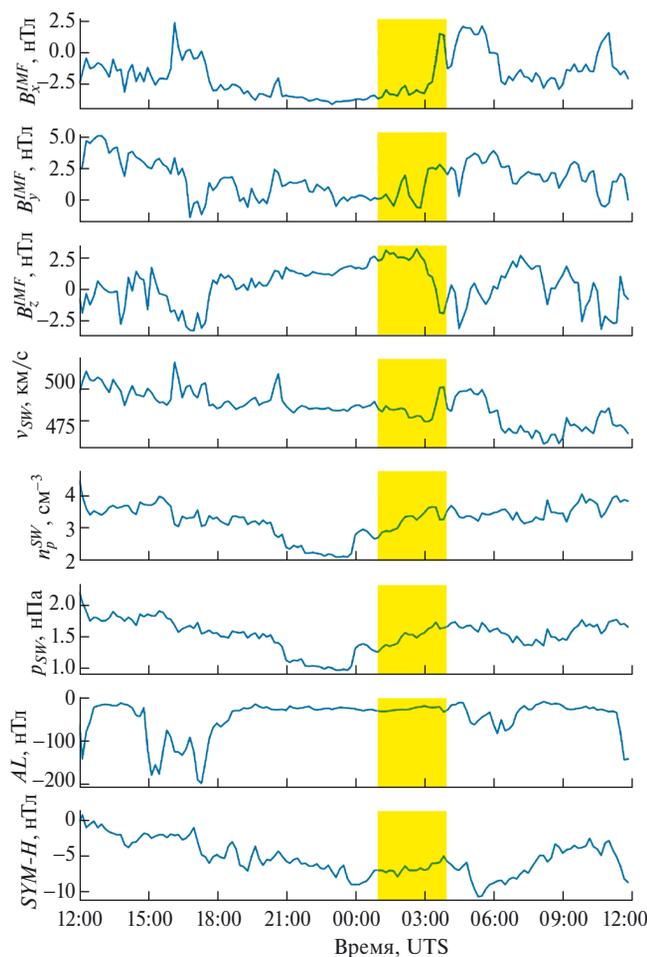


Рис. 1а. Параметры ММП и солнечного ветра, геомагнитной активности для интервала 14.VI.2017 в 01:00–04:00 UT по одному минутным данным OMNI. Фоном отмечен анализируемый интервал времени.

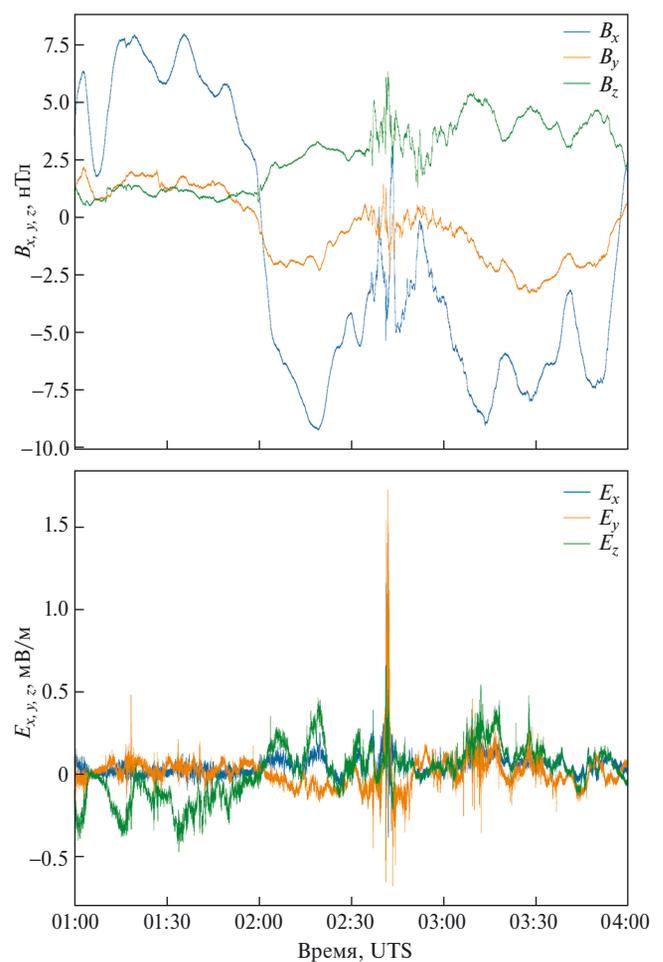


Рис. 1б. Флуктуации магнитного (B_x , B_y , B_z) и электрического (E_x , E_y , E_z) поля в интервале 14.VI.2017 в 01:00–04:00 UT по данным с *MMS-1*.

B_z -компоненты магнитного поля. На рис. 2 показана спектральная плотность мощности флуктуаций компонент магнитного и электрического поля (E_x, E_y, E_z – левая колонка, B_x, B_y, B_z – правая колонка) в зависимости от частоты и их степенная аппроксимация с показателем спектра α . Показаны значения полученных показателей спектров. Прежде всего необходимо отметить, что наклоны спектров значительно различаются для электрического и магнитного поля, что свидетельствует, в соответствии с работой [8], о значительном вкладе электростатических

флуктуаций. Показатели спектров различаются для компонент поля, но такие различия незначительны. На частотах, приближающихся к концу анализируемого интервала, наблюдается резкое уменьшение показателя спектра. Наблюдаемое выполаживание спектра (*англ.* roll-off в соответствии с исследованием [10]) в данном случае не является физическим эффектом. Эффект выполаживания спектра возникает в процессе фильтрации регистрируемого сигнала при уменьшении отношения сигнал/шум. Для проверки данного утверждения рассмотрим другой входящий

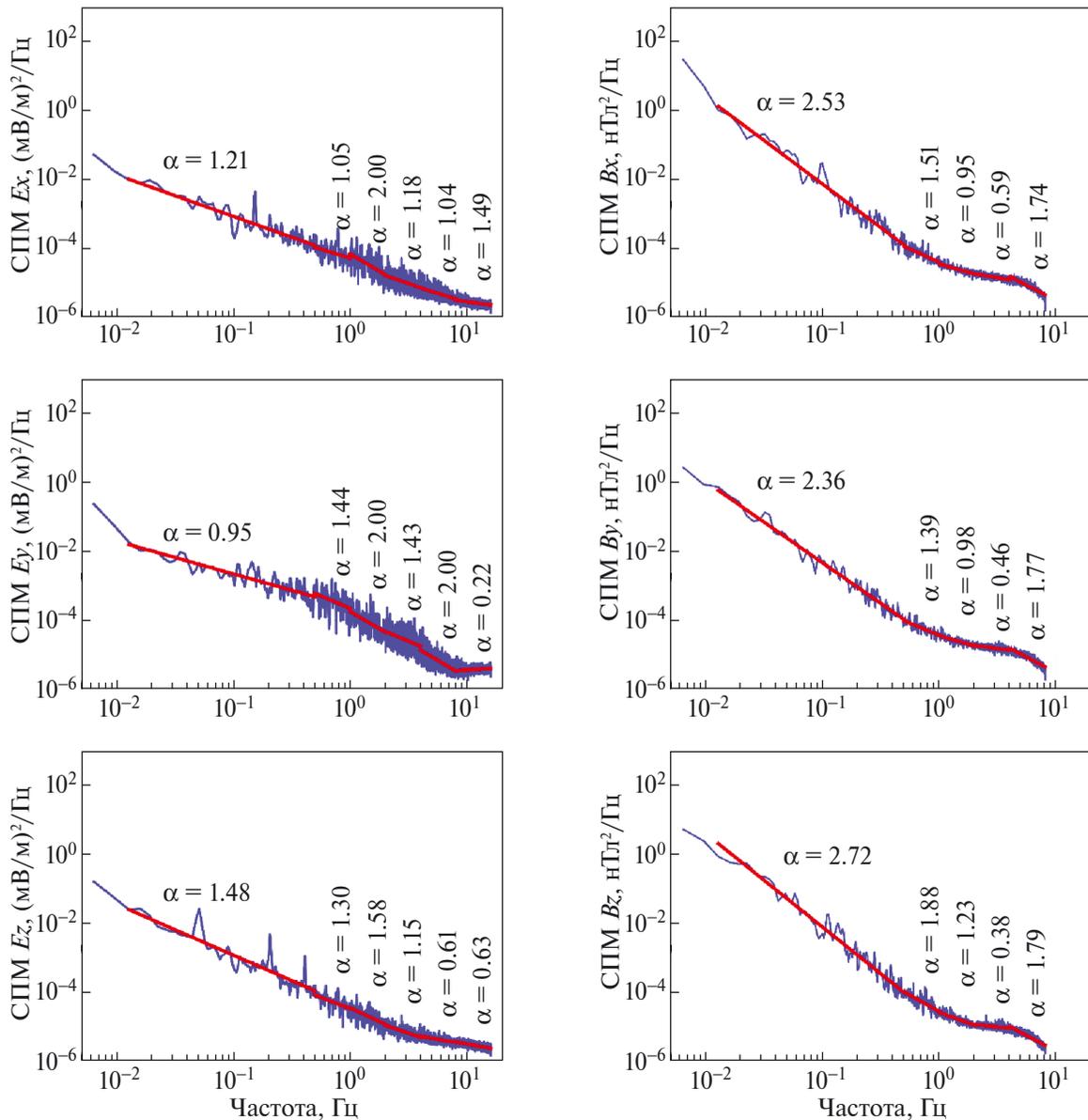


Рис. 2. Примеры спектров флуктуаций компонент электрического и магнитного поля при низком уровне флуктуаций (событие 14.VI.2017 в 01:00–04:00 UT). По горизонтальной оси – частота, по вертикальной – спектральная плотность мощности.

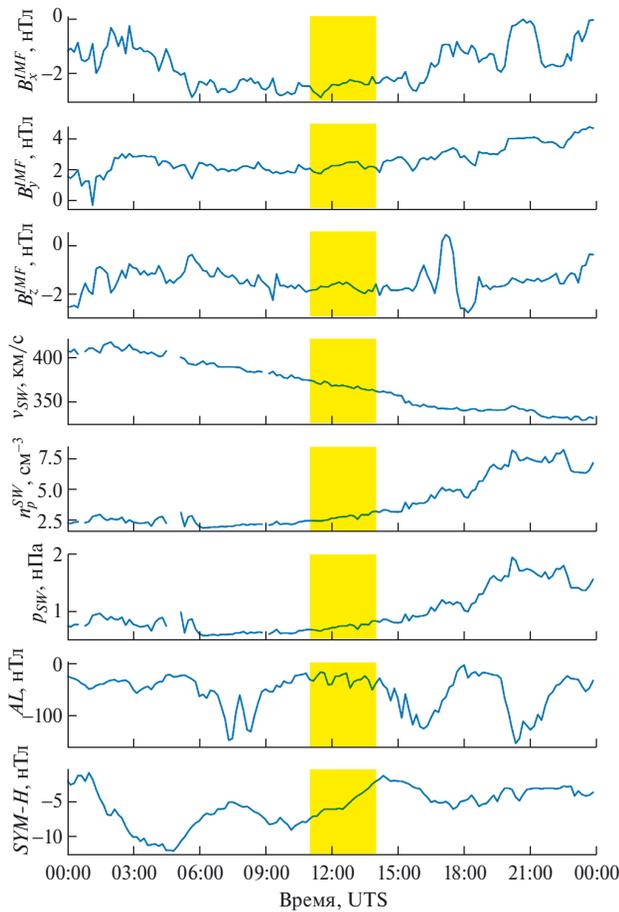


Рис. 3а. Параметры ММП и солнечного ветра, геомагнитной активности для интервала 15.VII.2018 в 11:00–14:00 по одноминутным данным OMNI. Фоном отмечен анализируемый интервал времени.

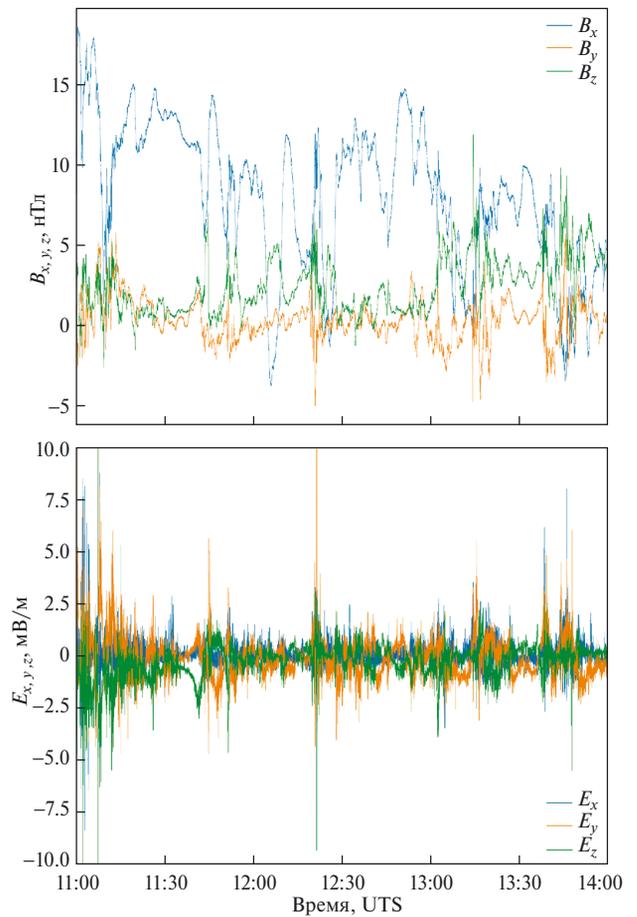


Рис. 3б. Флуктуации магнитного (B_x , B_y , B_z) и электрического (E_x , E_y , E_z) поля в интервале 15.VII.2018 в 11:00–14:00 по данным с MMS-1.

в число отобранных по указанным выше критериям интервал, во время которого наблюдались амплитуды флуктуаций электрического поля, существенно превышающие амплитуды во время события 14.VI.2017.

На рис. 3а, б аналогично рис. 1а, б приведены параметры межпланетного магнитного поля, солнечного ветра, геомагнитной активности и флуктуации магнитного и электрического поля для более активного интервала 15.VII.2018 в 11:00–14:00 UT. Во время измерений координаты спутников в системе координат GSM были: $X = -(22.4-21.5) R_E$, $Y = (1.8-2.7) R_E$, $Z = (6.7-7.3) R_E$. Параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитные индексы для данного события по данным OMNI с минутным разрешением: скорость солнечного ветра была в пределах $v_{SW} = 370-360$ км/с, плотность в пределах $n_{SW} = 2.4-3.3$ см⁻³, давление $p_{SW} = 0.64-0.86$ нПа; компоненты межпланетного магнитного поля: $B_x^{IMF} = -(2.6-2)$ нТл,

$B_y^{IMF} = (1.9-2.9)$ нТл, $B_z^{IMF} = -(2.2-1.2)$ нТл; геомагнитные условия также были спокойными: $Kp = 0-1^-$, $SYM-H = -(8-2)$ нТл, $AL = -(79-8)$ нТл.

В данном событии амплитуда флуктуаций электрического поля превышала 10 мВ/м. На рис. 4 показаны спектры флуктуаций компонент электрического и магнитного поля при повышенном уровне флуктуаций в спокойных геомагнитных условиях. Сравнение рис. 2б и 4б показывает, что повышение уровня флуктуаций приводит к подъему спектра и исчезновению выполаживания спектра в верхней части частотного диапазона. Необходимо отметить, что исследования событий с разрешением до 8000 с⁻¹ (burst mode) в работах [8, 9, 20 и др.] показывали возникновение выполаживания спектра только в конце исследуемого диапазона, что подтверждает утверждение о роли шумов в изменениях наклонов спектров при интерпретациях выполаживаний в наклонах спектров.

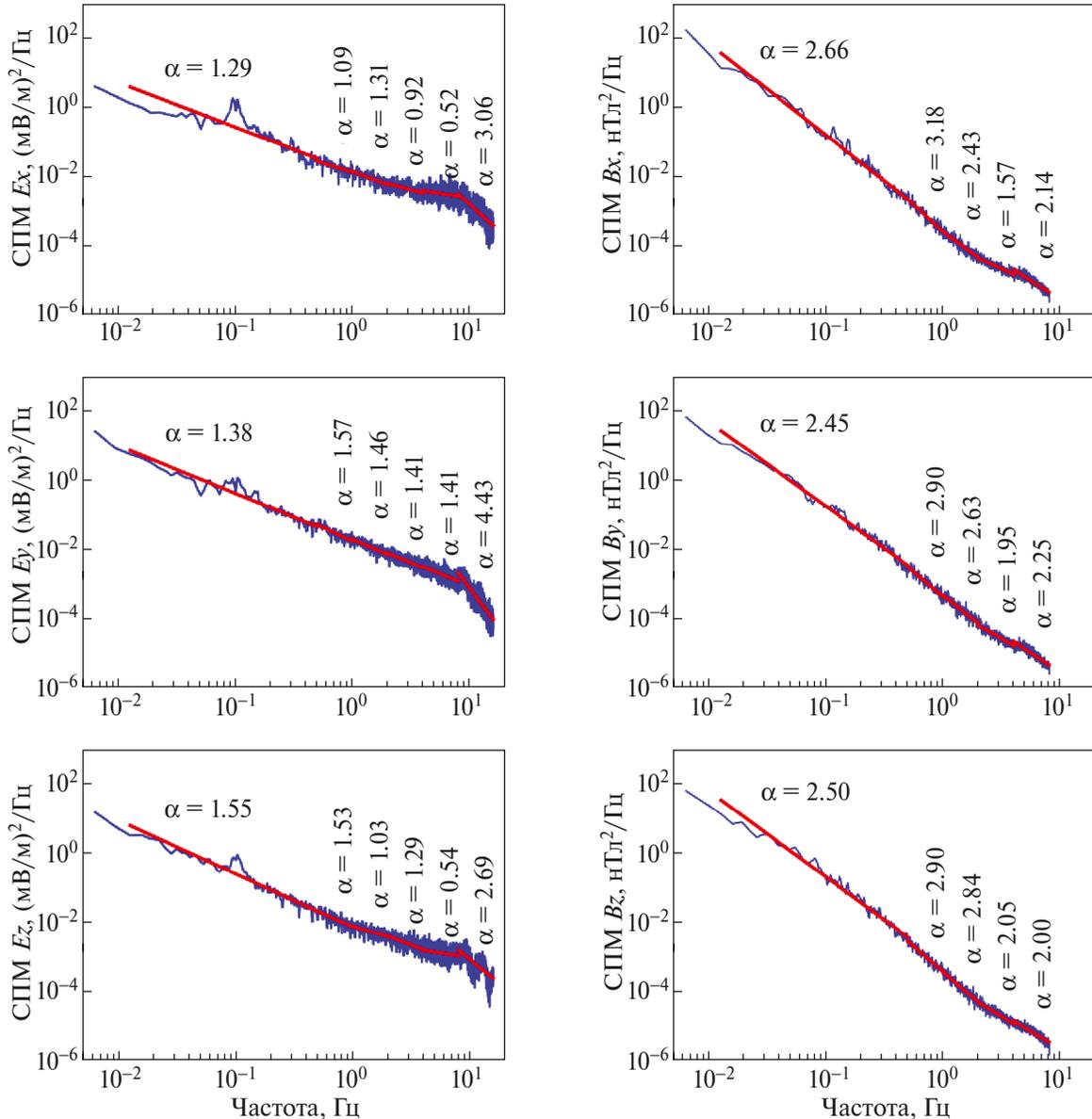


Рис. 4. Примеры спектров флуктуаций компонент электрического и магнитного поля при повышенном уровне флуктуаций в спокойных геомагнитных условиях (событие 15.VII.2018 в 11:00–14:00).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для статистического исследования спектров флуктуаций были взяты все 12-минутные интервалы нахождения *MMS* в плазменном слое, полученные попарным объединением идущих подряд 6-минутных интервалов. Данные с каждого из четырех спутников обрабатывались независимо. Методом наименьших квадратов построены аппроксимации зависимости спектральной плотности мощности от частоты степенными функциями $\text{СПМ}(E) \sim f^{-\alpha}$ в диапазонах частот 0.014–0.5, 0.5–1, 1–2, 2–4, 4–8, 8–16 Гц,

$\text{СПМ}(B) \sim f^{-\alpha}$ в диапазонах частот $f = 0.014$ –0.5, 0.5–1, 1–2, 2–4, 4–8 Гц. Кроме того, для каждого 12-минутного интервала вычислены среднеквадратичные значения флуктуаций компонент электрического и магнитного поля E_{rms} и B_{rms} . Всего получены спектральные индексы и среднеквадратичные значения электрического и магнитного поля для 113 983 интервалов. На данном этапе исследования из рассмотрения были исключены интервалы, когда усредненная гидродинамическая скорость превышала 100 км/с (таких интервалов оказалось 10 569, что соответствует

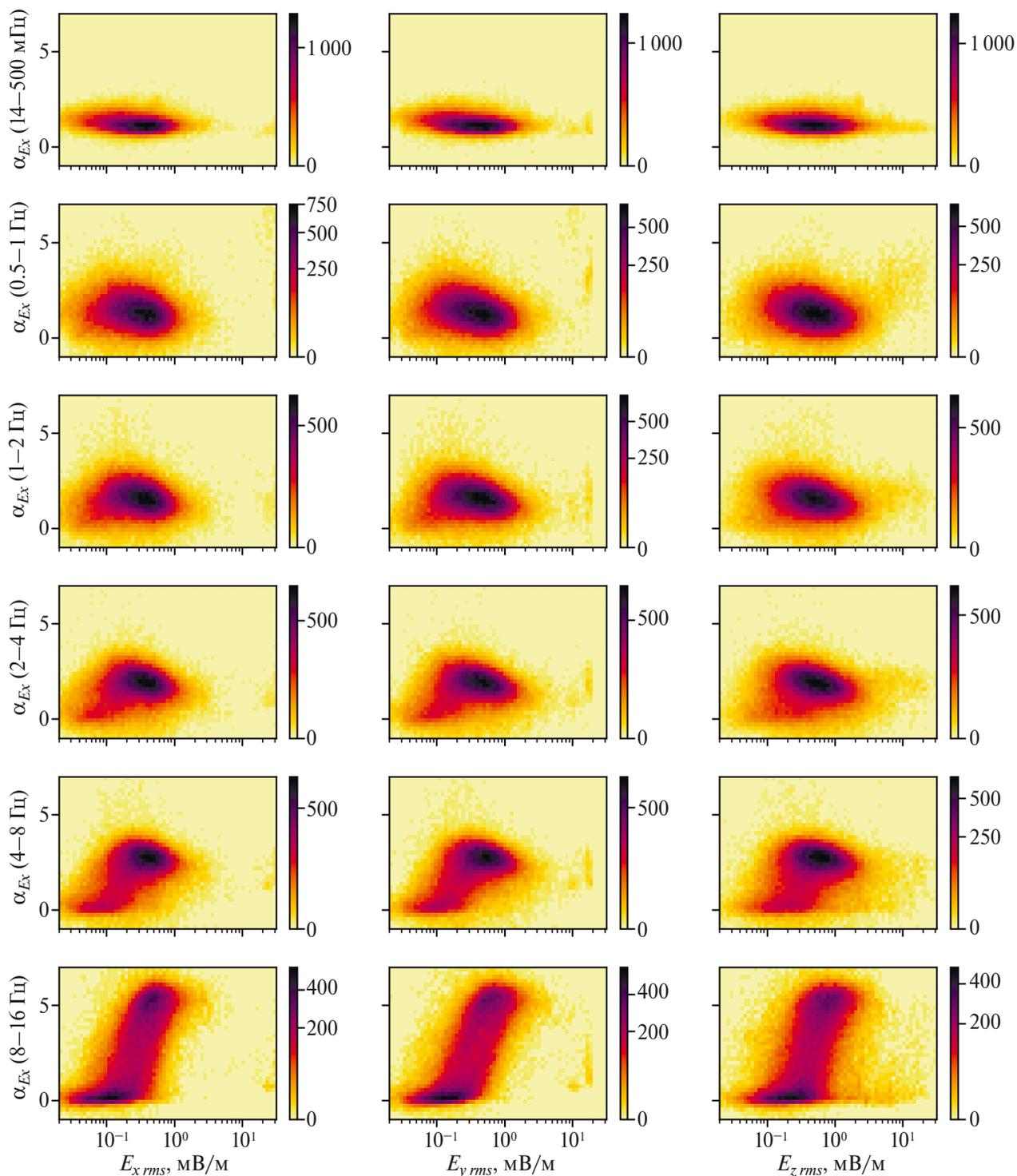


Рис. 5. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов x-компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

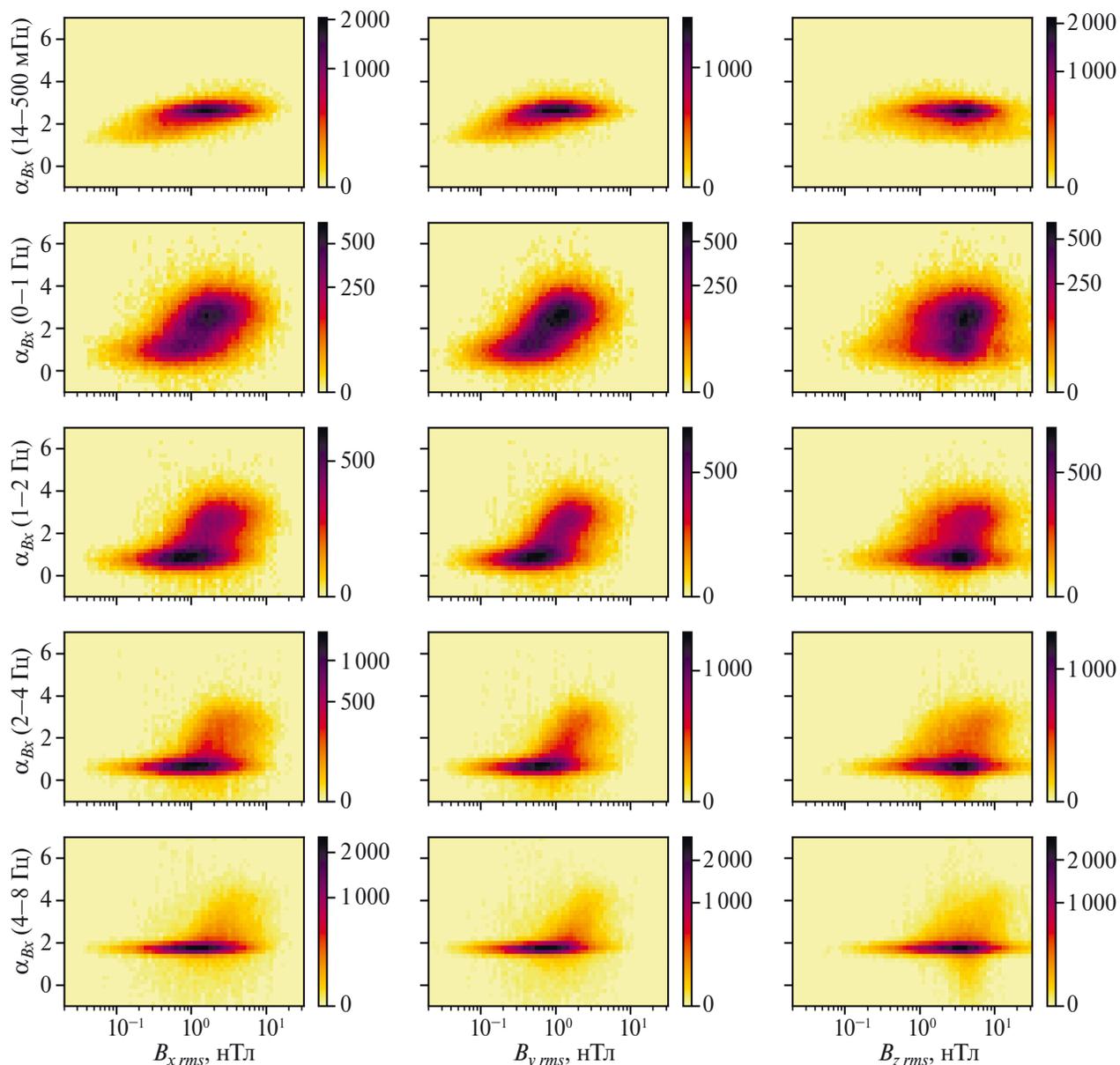


Рис. 6. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов x -компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.

$\sim 10\%$ массива данных). Во всех рассмотренных интервалах средняя скорость плазмы была мала по сравнению со звуковой и альвеновской, т.е. области быстрых течений (BBF) не рассматривались. Таким образом, для статистического анализа использовались 103 414 интервалов.

Анализ рис. 2 и 4 выявил возможность существования зависимости показателей спектров от уровня магнитных флуктуаций. Для проверки данного предположения были построены

зависимости усредненных показателей спектра от усредненных уровней компонент электрического поля и магнитного поля. На рис. 5, 6 показаны двумерные гистограммы спектральных индексов для x -компонент электрического и магнитного поля в зависимости от усредненных по интервалу компонент электрического и магнитного поля. Двумерные гистограммы для других компонент и перекрестные гистограммы содержатся в дополнительном материале. Каждая точка соответствует одному 12-минутному

интервалу. Уровень разброса точек характеризует разброс полученных значений. Как указано выше, близкие к нулю значения показателей спектра не имеют физического значения и соответствуют уровню флуктуаций, не превышающему уровня шумов приборов. В ряде случаев наблюдается тенденция уменьшения наклона спектра с ростом уровня флуктуаций.

ОБСУЖДЕНИЕ

Турбулентность плазменного слоя в хвосте магнитосферы Земли давно регистрируется различными космическими аппаратами, но изучение флуктуаций всех трех компонент электрического поля в широком частотном диапазоне стало возможным только в процессе реализации миссии *MMS*. Амплитуды генерируемых в магнитосфере крупномасштабных электрических полей магнитосферной конвекции на исследуемых геоцентрических расстояниях невелики – ~ 0.1 мВ/м. В работе [8] при анализе в *burst mode* был зарегистрирован всплеск электрического поля в 250 мВ/м и амплитуды флуктуаций электростатической компоненты поля в 50 мВ/м. В описанном выше спокойном интервале 14.VI.2017 наблюдались амплитуды флуктуаций, от 5 до 17 раз превышающие поле утро – вечер, а в событии 15.VII.2018 амплитуды флуктуаций поля на два порядка превышали крупномасштабное поле конвекции утро – вечер. Отсюда следует, что наблюдаемый уровень флуктуаций электрического поля требует модификации традиционных представлений о роли различных процессов, связанных с существованием электрических полей в системе отсчета плазменного слоя.

На приведенных на рис. 2 и 4 спектрах наблюдаются степенные участки на частотах ниже 0.5 Гц. Показатели наклона спектров электрического поля значительно отличаются от показателей наклона магнитного поля. При этом различия между спектрами x -, y - и z -компонент незначительны.

Приведенное исследование подтверждает полученные ранее выводы о формах спектров флуктуаций магнитного поля в плазменном слое магнитосферы Земли и дает новую информацию по флуктуациям электрического поля. Наклон спектра флуктуаций магнитного поля близок к значениям, полученным ранее, – $\alpha \sim 2.5$ [11, 27]. Показатели спектра флуктуаций электрического поля в анализируемом частотном диапазоне близки к значениям, полученным при изучении отдельных событий в *burst mode* в работах [8, 20]. Показатели спектров либо остаются

постоянными с увеличением уровня флуктуаций, либо наблюдается тенденция к уменьшению показателя спектра в данном частотном диапазоне с ростом уровня флуктуаций. Однако полученные статистические результаты свидетельствуют о большом разбросе реальных наклонов спектров.

Настоящее исследование было ограничено областью ($X < -6 R_E$, $|Y| < |X|$, $|Z| < 8 R_E$), в которой ранее в работе [19] по данным миссии *THEMIS* проводился анализ флуктуаций скорости плазмы и определялись коэффициенты вихревой диффузии при ограничениях на концентрацию и температуру ионов плазмы – $n_i > 0.1 \text{ см}^{-3}$, $T_i > 0.5 \text{ кэВ}$, на плазменный параметр – $\beta > 1$. Ограничение $\beta > 1$ позволяло выделить область центрального плазменного слоя, где плотность энергии плазмы превышает плотность энергии магнитного поля и при отсутствии столкновений развиваются различные плазменные неустойчивости. Ограничение на скорость движения плазмы ($< 100 \text{ км/с}$) дало возможность исключить области с повышенным уровнем флуктуаций электрического и магнитного поля, характерных для *BBF*, и убедиться в том, что регистрируемый *MMS* высокий уровень флуктуаций электрического и магнитного поля характерен для всех исследованных временных интервалов.

Наблюдаемые степенные формы спектров свидетельствуют о действии нелинейных процессов, приводящих к перекачке энергии по спектру турбулентности, характерных при формировании трехмерных турбулентных каскадов (перекачки энергии от больших масштабов к меньшим). В рассматриваемый в данной работе диапазон частот попадают ионно-циклотронная $f_{ci} \sim 0.1$ Гц и нижнегибридная $f_{lh} \sim 10$ Гц частота. Все остальные характерные частоты плазмы существенно выше исследуемого диапазона. Для выделения генерации определенной моды в турбулентной плазме (см., например, обзор [18]) должен быть достаточно надежно выделен пик (*англ. bump*) на спектре. Отсутствие четко выделяемых пиков в нашем исследовании не позволяет отчетливо выделять генерацию отдельных мод. Такое выделение для конкретных случаев становится важной частью исследований различных групп и входит в число приоритетных направлений изучения плазменных процессов в хвосте магнитосферы Земли. При этом определение усредненных характеристик флуктуаций представляется важной составной частью анализа крупномасштабной магнитосферной

динамики. Поэтому необходимо в дальнейшем продолжить исследования флуктуаций спектров в спокойных геомагнитных условиях, особенно в связи с решением проблем формирования плазменного слоя и его устойчивости в зависимости от ориентации ММП и геомагнитной активности, так как, например, при длительной северной ориентации ММП происходит разрушение плазменного слоя, заполнение плазмой плазменного слоя долей хвоста (см. ссылки в обзорах [2, 15]), а в полярной шапке наблюдаются авроральные структуры (дуги в шапке и тета-аврора).

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило получить ряд статистических результатов в спокойных условиях вне областей ускоренных потоков плазмы типа ВВФ.

1. В центральном плазменном слое при значениях плазменного параметра $\beta > 1$ постоянно наблюдаются флуктуации электрического и магнитного поля.

2. Амплитуды флуктуаций электрического поля значительно (как правило, на 1–2 порядка) превышают значения крупномасштабных полей конвекции.

3. Спектры флуктуаций электрического и магнитного поля в центральном плазменном слое при низком уровне флуктуаций имеют степенной характер на частотах ниже 0.5 Гц (что в разы выше ионной гирочастоты, но на порядок ниже всех остальных характерных частот плазмы).

4. Показатели наклонов спектров электрического и магнитного поля на частотах ниже 0.5 Гц существенно различаются: $\alpha_E = 1.3 \pm 0.4$; $\alpha_B = 2.4 \pm 0.4$.

5. Показатели наклонов спектров практически не изменяются при увеличении уровня флуктуаций.

Полученные статистические зависимости и выявленные закономерности можно использовать при моделировании процессов в центральном плазменном слое магнитосферы Земли в спокойных условиях.

Авторы благодарны коллективу проекта *MMS* за возможность использования данных, а также создателям базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00076 (<https://rscf.ru/project/23-22-00076/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Angelopoulos V., Mukai T., Kokubun S.* Evidence for intermittency in Earth's plasma sheet and implications for self-organized criticality // *Physics of Plasmas*. 1999. V. 6. P. 4161–4168. <https://doi.org/10.1063/1.873681>
2. *Antonova E. E., Stepanova M. V.* The impact of turbulence on physics of the geomagnetic tail // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021. V. 8. Art. ID. 622570. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.622570>
3. *Baker D. N., Riesberg L., Pankratz C. K. et al.* Magnetospheric Multiscale Instrument Suite Operations and Data System // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. P. 545–575. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0128-5>
4. *Borovsky J. E., Elphic R. C., Funsten H. O. et al.* The Earth's plasma sheet as a laboratory for flow turbulence in high- β MHD // *J. Plasma Physics*. 1997. V. 57. Iss. 1. P. 1–34. <https://doi.org/10.1017/S0022377896005259>
5. *Borovsky J. E., Funsten H. O.* MHD turbulence in the Earth's plasma sheet: Dynamics, dissipation, and driving // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. Iss. A7. Art. ID. 1284. <https://doi.org/10.1029/2002JA009625>
6. *Burch J. L., Moore T. E., Torbert R. B. et al.* Magnetospheric Multiscale overview and science objectives // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 5–21. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9>
7. *Chasapis A., Matthaeus W. H., Parashar T. N. et al.* High-resolution statistics of solar wind turbulence at kinetic scales using the Magnetospheric Multiscale Mission // *The Astrophysical J. Letters*. 2017. V. 844. Iss. 1. Art. ID. L9. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa7ddd>
8. *Ergun R. E., Goodrich K. A., Wilder F. D. et al.* Magnetic reconnection, turbulence, and particle acceleration: Observations in the Earth's magnetotail // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. Iss. 8. P. 3338–3347. <https://doi.org/10.1002/2018GL076993>
9. *Ergun R. E., Usanova M. E., Turner D. L. et al.* Bursty bulk flow turbulence as a source of energetic particles to the outer radiation belt // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. Iss. 11. Art. ID. e2022GL098113. <https://doi.org/10.1029/2022GL098113>
10. *Eastwood J. P., Phan T. D., Bale S. D. et al.* Observations of turbulence generated by magnetic reconnection // *Physical Review Letters*. 2009. V. 102.

- Iss. 03. Art. ID. 035001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.035001>
11. *Echim M., Chang T., Kovacs P.* Turbulence and complexity of magnetospheric plasmas // *Magnetospheres in the Solar System*. 1st ed. / ed. R. Maggiolo, N. André, H. Hasegawa, D.T. Welling. John Wiley and Sons, Inc., 2021. Ch. 5. P. 67–91. <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch5>
 12. *Khabarova O.V., Malandraki O., Malova H. et al.* Current sheets, plasmoids and flux ropes in the heliosphere. Pt. 1. General and observational aspects: 2-d or not 2-d? // *Space Science Reviews*. 2021. V. 217. Art. ID. 38. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00814-x>
 13. *Khotyaintsev Y., Lindqvist P.-A., Nilsson T.* Spin-plane Double Probe instrument/Axial Double Probe instrument (SDP/ADP) Data Products Guide. 2017. https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/datasets/fields/EDP_Data_Products_Guide_v1.3.pdf
 14. *Leinweber H.K., Bromund K.R., Strangeway R.J.* The MMS Fluxgate Magnetometers Science Data Products Guide. 2016. https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/datasets/fields/FGM_DataProductsGuide2016Apr20.pdf
 15. *Овчинников И.Л., Антонова Е.Е.* Турбулентный транспорт магнитосферы Земли: обзор результатов наблюдений и моделирования // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2017. Т. 57. № 6. С. 706–714. <http://dx.doi.org/10.7868/S0016794017060086> (Ovchinnikov I.L., Antonova E.E. Turbulent transport of the Earth magnetosphere: Review of the results of observations and modeling // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. V. 57. Iss.6. P. 655–663. <https://doi.org/10.1134/S0016793217060081>).
 16. *Petrukovich A.A., Malakhov D.V.* Variability of magnetic field spectra in the Earth’s magnetotail // *Nonlinear Process in Geophysics*. 2009. V. 16. P. 691–698. <https://doi.org/10.5194/npg-16-691-2009>
 17. *Pollock C., Moore T., Jacques A. et al.* Fast Plasma Investigation for Magnetospheric Multiscale // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. P. 331–406. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4>
 18. *Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G.* Plasma and Magnetic Field Turbulence in the Earth’s Magnetosheath at Ion Scales // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021. V. 7. Art. ID. 616635. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.616635>
 19. *Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A. et al.* Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. Iss. A5. Art. ID. A00I24. <https://doi.org/10.1029/2010JA015887>
 20. *Stawarz J.E., Matteini L., Parashar T.N. et al.* Comparative analysis of the various generalized Ohm’s law terms in magnetosheath turbulence as observed by Magnetospheric Multiscale // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2021. V. 126. Iss. 1. Art. ID. e2020JA028447. <https://doi.org/10.1029/2020JA028447>
 21. *Taylor G.I.* The spectrum of turbulence // *Proc. Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1938. V. 164. P. 476–490. <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032>
 22. *Torbert R.B., Russell C.T., Magnes W. et al.* The FIELDS Instrument Suite on MMS: Scientific Objectives, Measurements, and Data Products // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. P. 105–135. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0109-8>
 23. *Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R. et al.* Magnetic turbulence in the plasma sheet // *J. Geophysical Research*. 2004. V. 109. Iss. A11. Art. ID. 11215. <https://doi.org/10.1029/2004JA010404>
 24. *Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R. et al.* Bursty bulk flow driven turbulence in the Earth’s plasma sheet // *Space Science Reviews*. 2006. V. 122. P. 301–311. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-6987-7>
 25. *Weygant J.M., Kivelson M.G., Khurana K.K. et al.* Plasma sheet turbulence observed by Cluster II // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. Iss. A1. Art. ID. A01205. <https://doi.org/10.1029/2004JA010581>
 26. *Yordanova E., Vörös Z., Varsani A. et al.* Electron scale structures and magnetic reconnection signatures in the turbulent magnetosheath // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 12. P. 5969–5978. <https://doi.org/10.1002/2016GL069191>
 27. *Zelenyi L., Artemyev A., Petrukovich A.* Properties of Magnetic Field Fluctuations in the Earth’s Magnetotail and Implications for the General Problem of Structure Formation in Hot Plasmas // *Space Science Reviews*. 2015. V. 188. P. 287–310. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0037-7>

Дополнительный материал суммирует все зависимости спектральных индексов X , Y , Z компонент электрического и магнитного поля от уровня флуктуаций компонент электрического и магнитного полей. Цветом показано количество случаев.

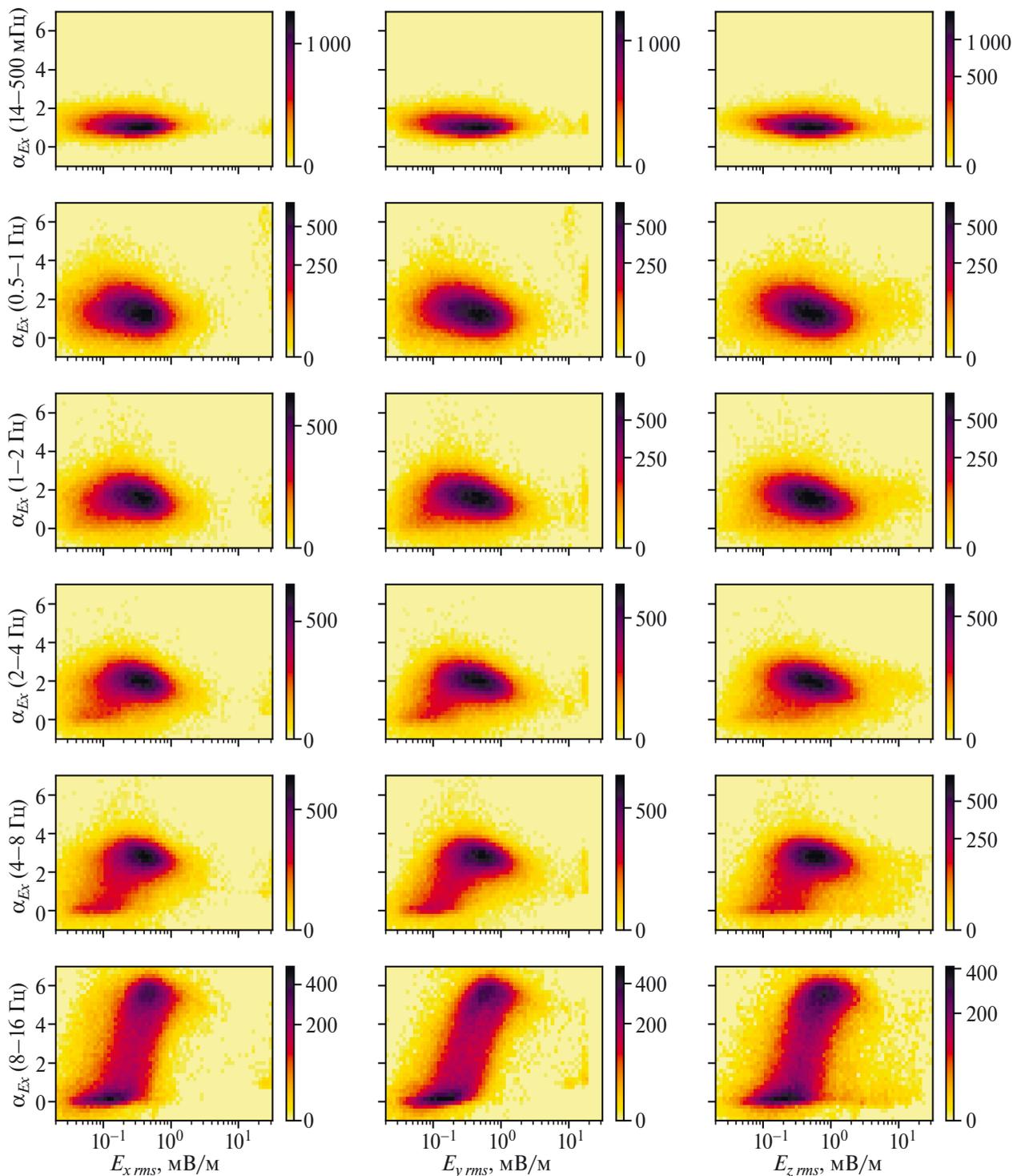


Рис. 1, II. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов x -компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

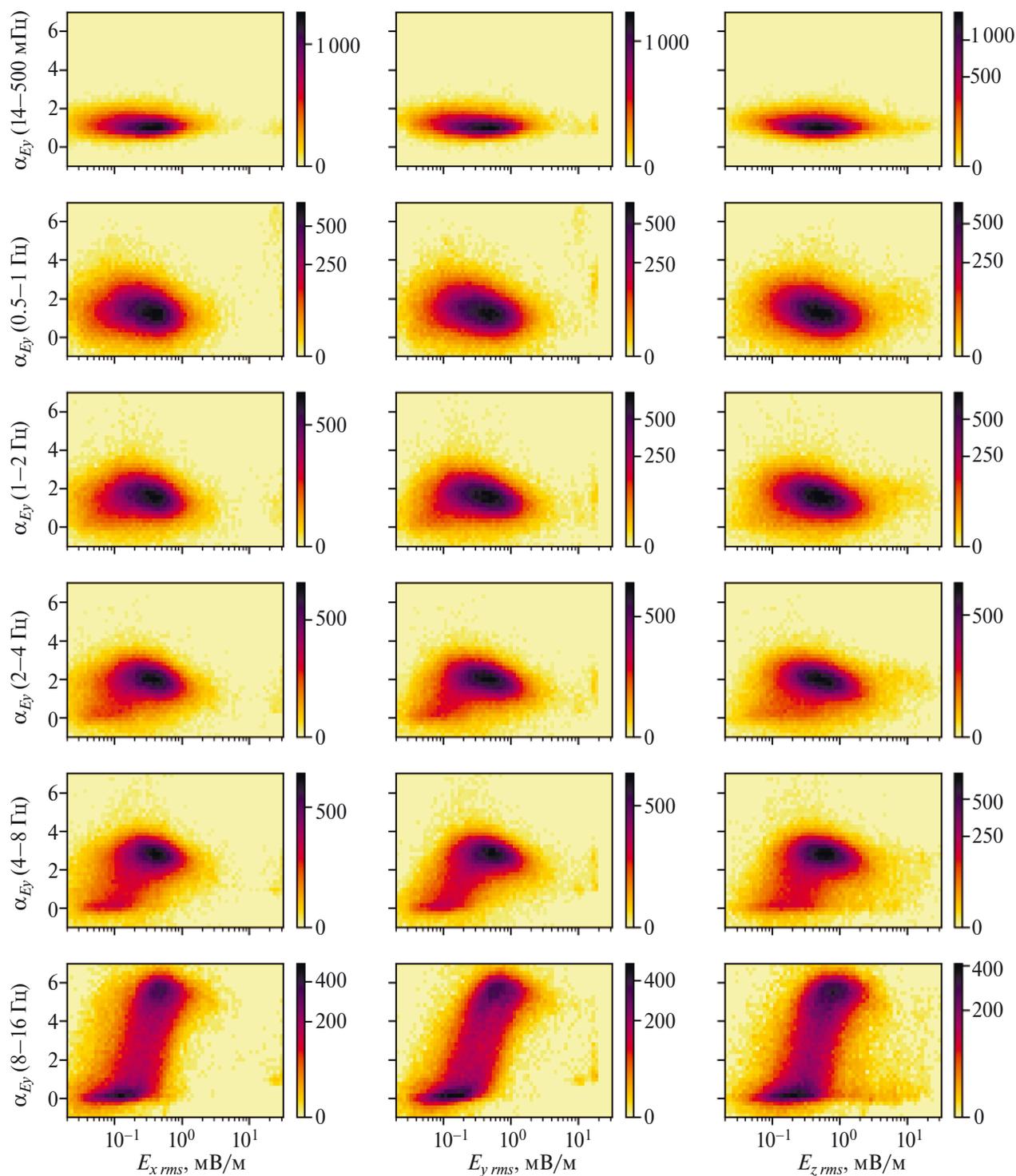


Рис. 2, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов у-компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

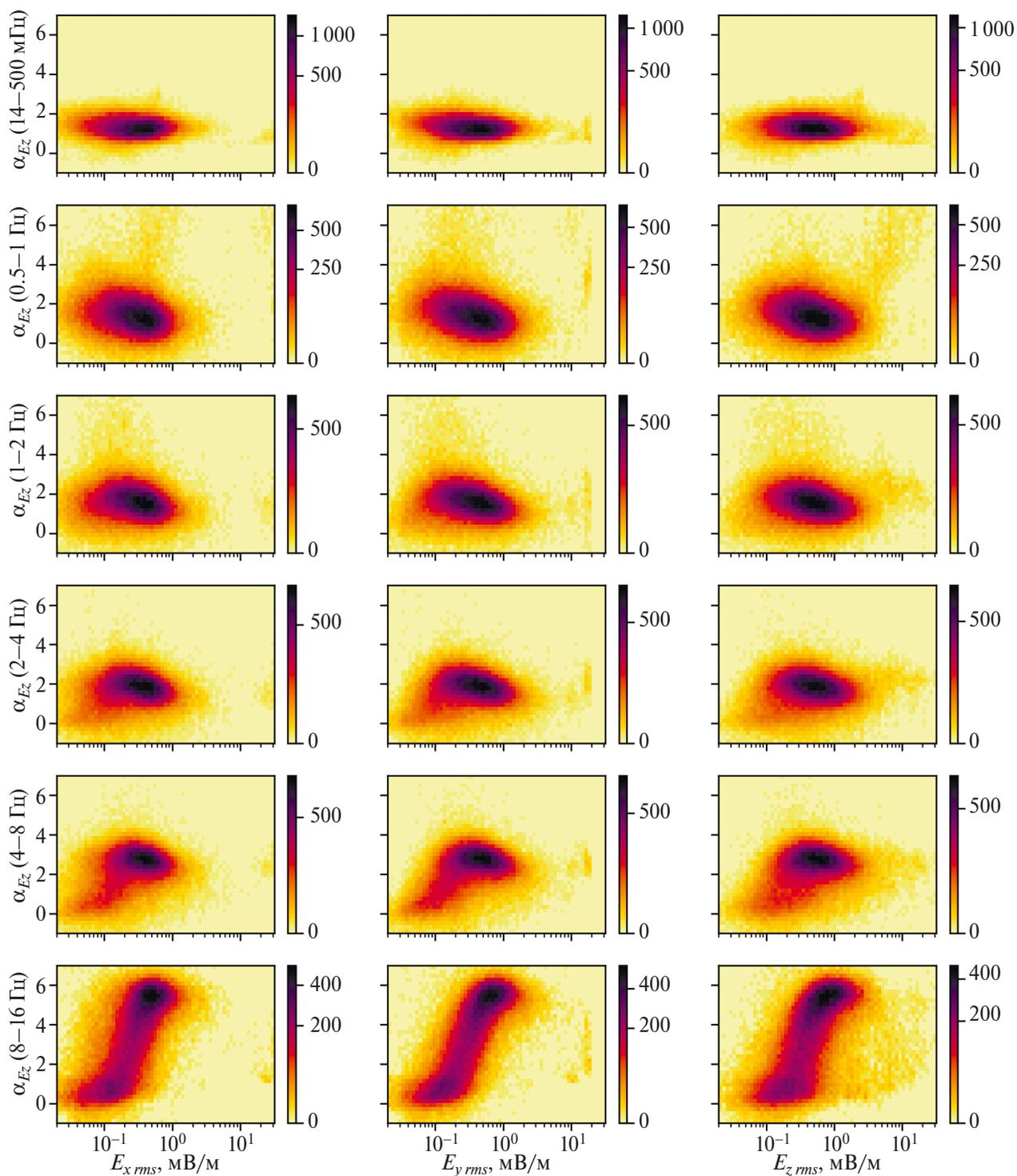


Рис. 3, III. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов z-компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

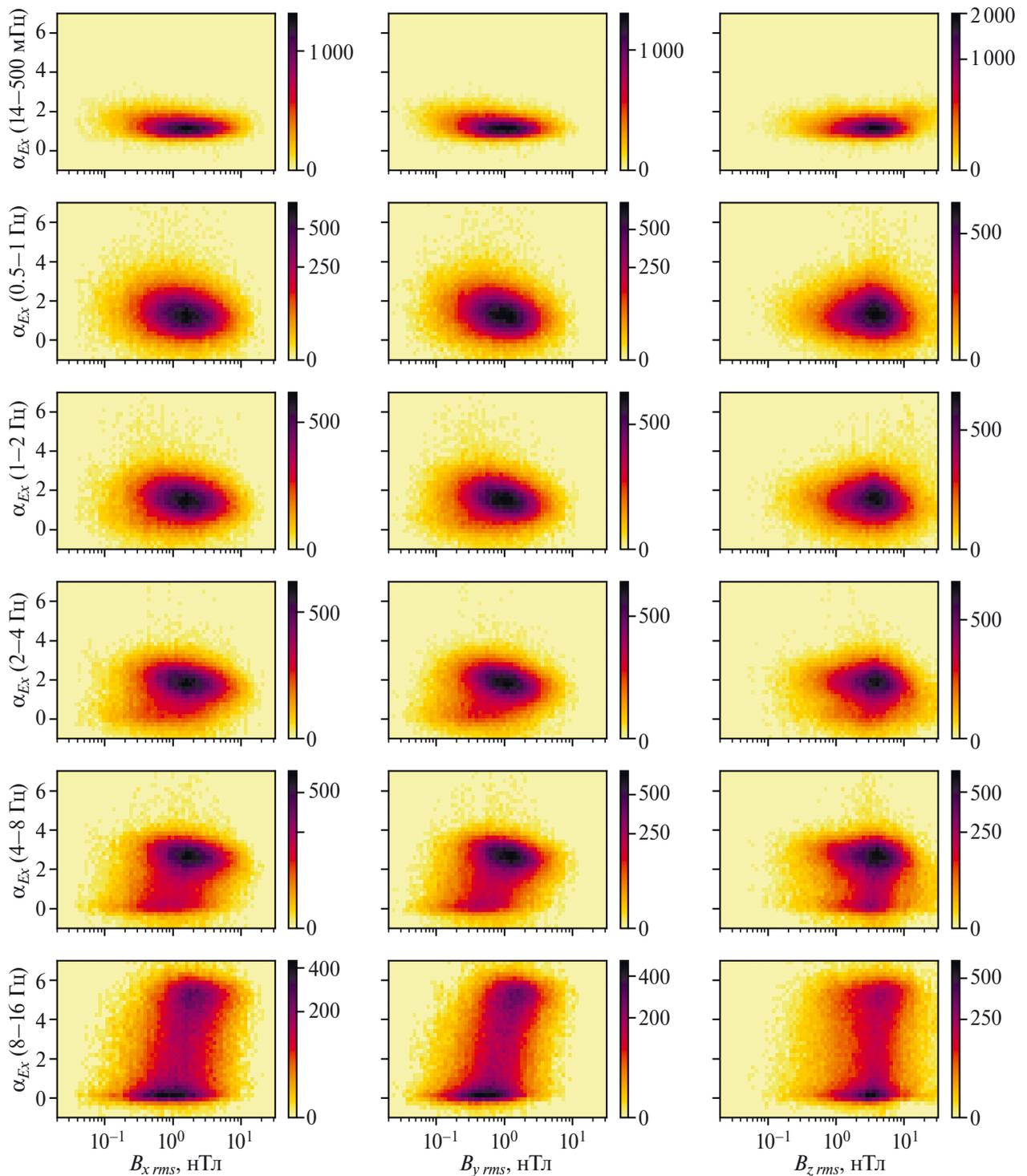


Рис. 4, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов x-компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.

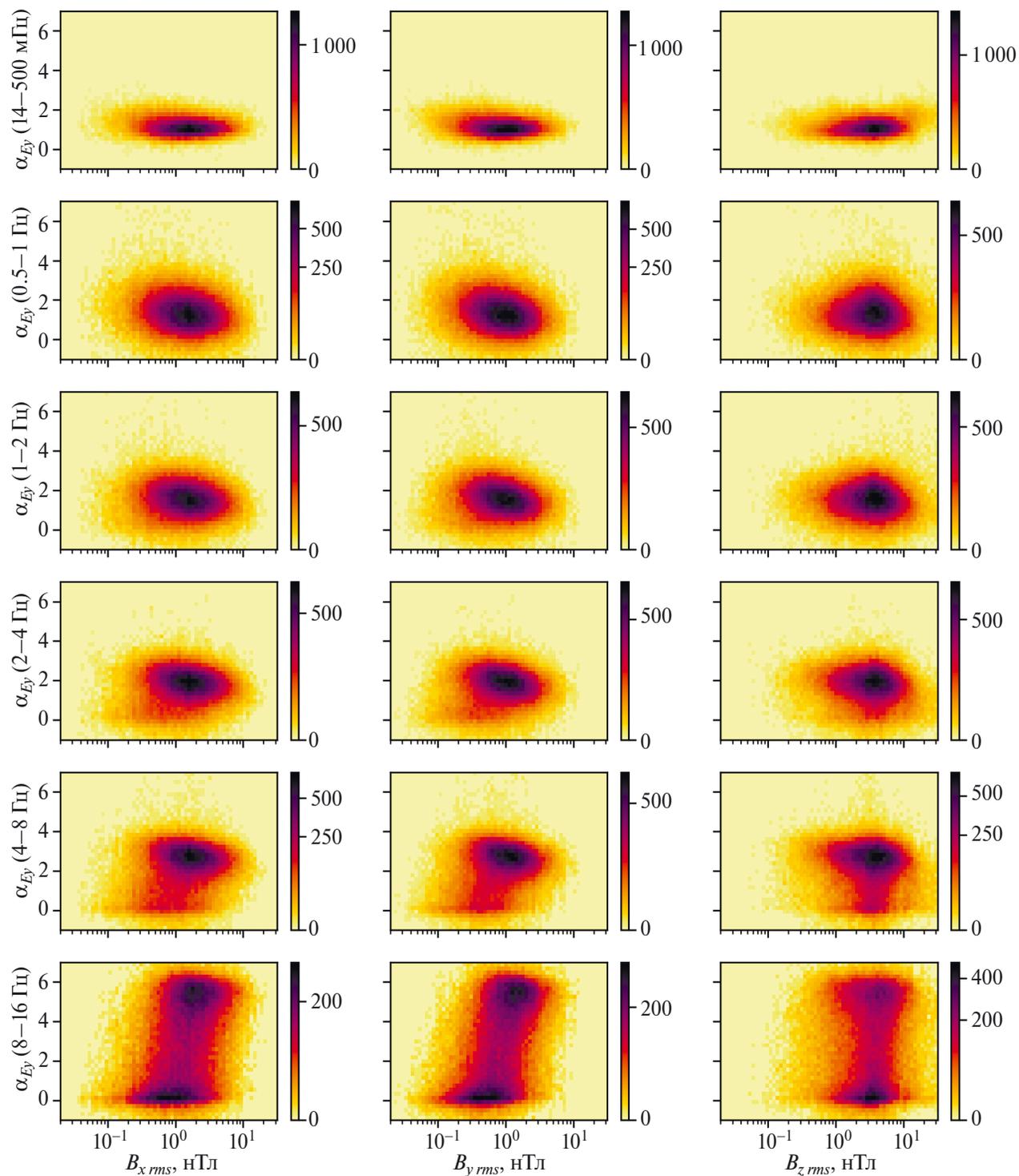


Рис. 5, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов у-компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.

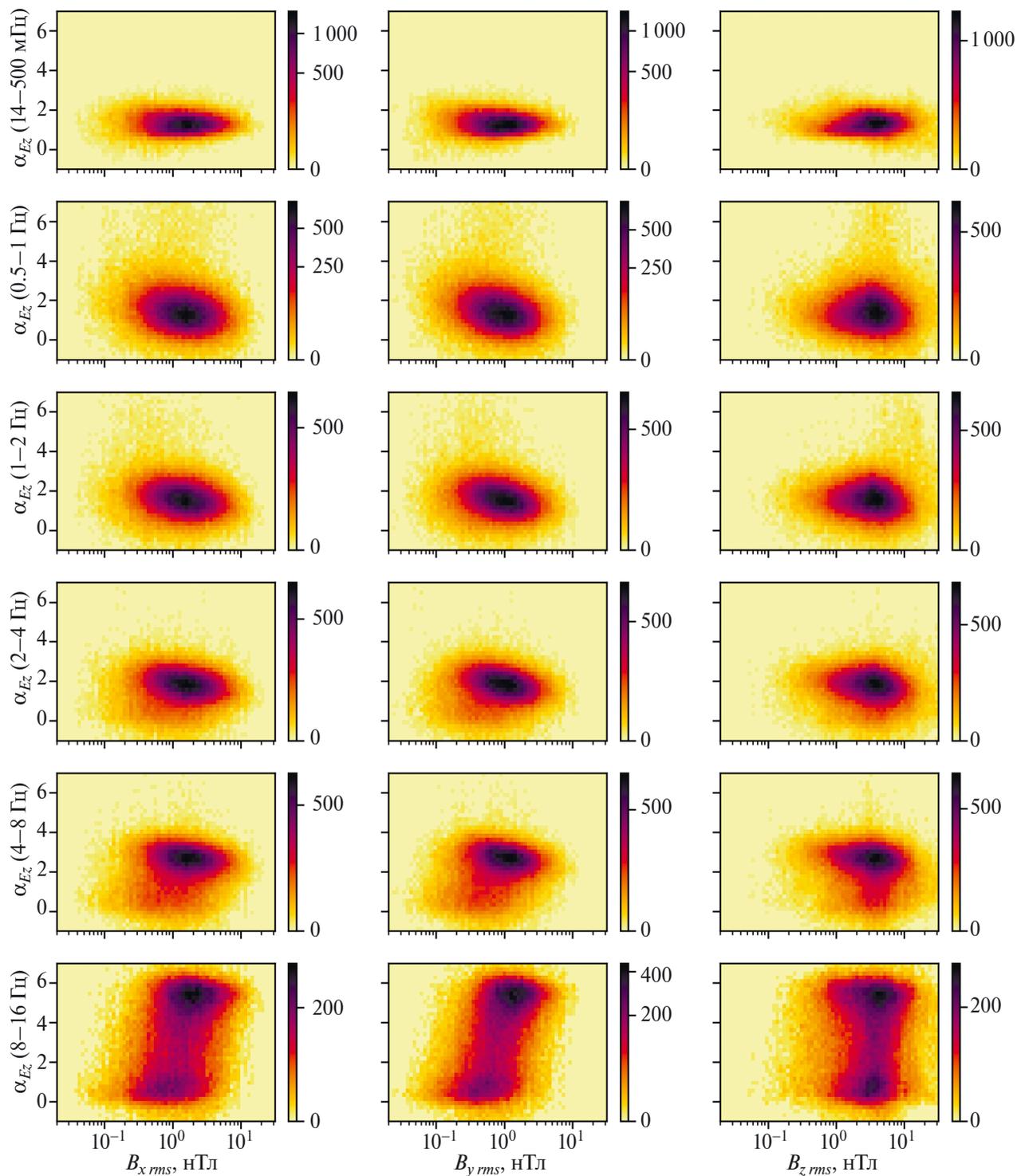


Рис. 6, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов z-компоненты электрического поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.

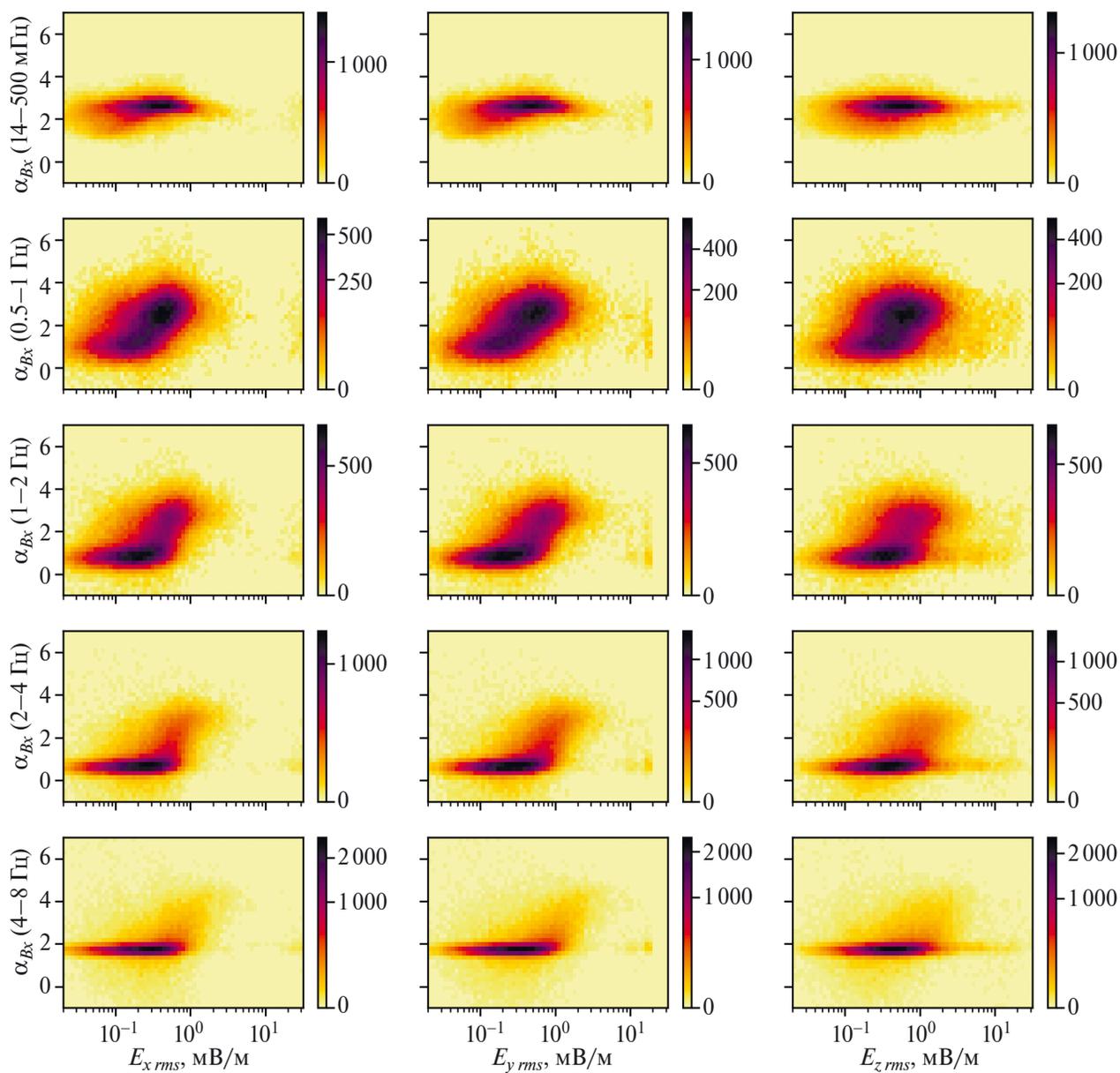


Рис. 7, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов x-компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

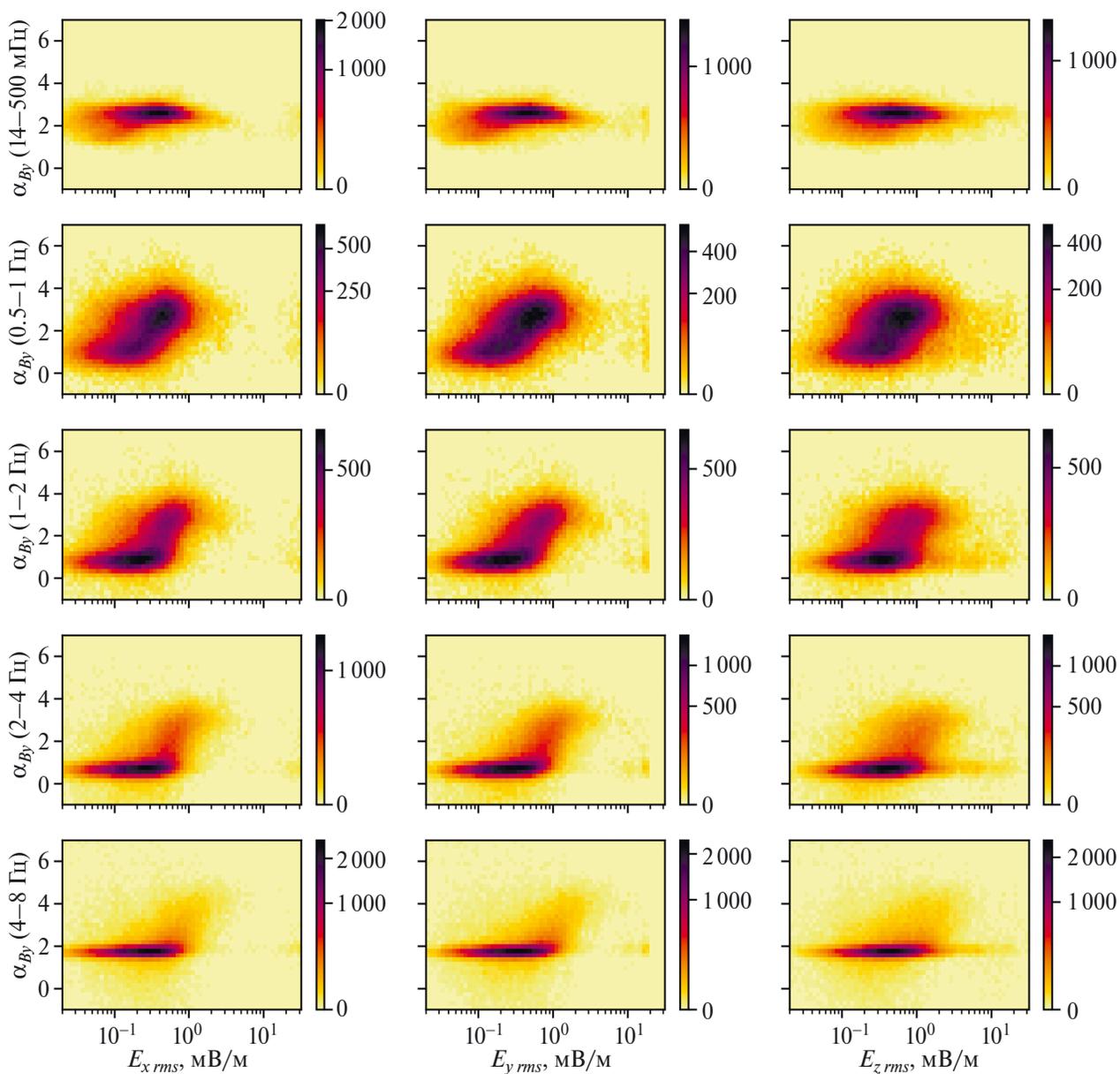


Рис. 8, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов у-компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

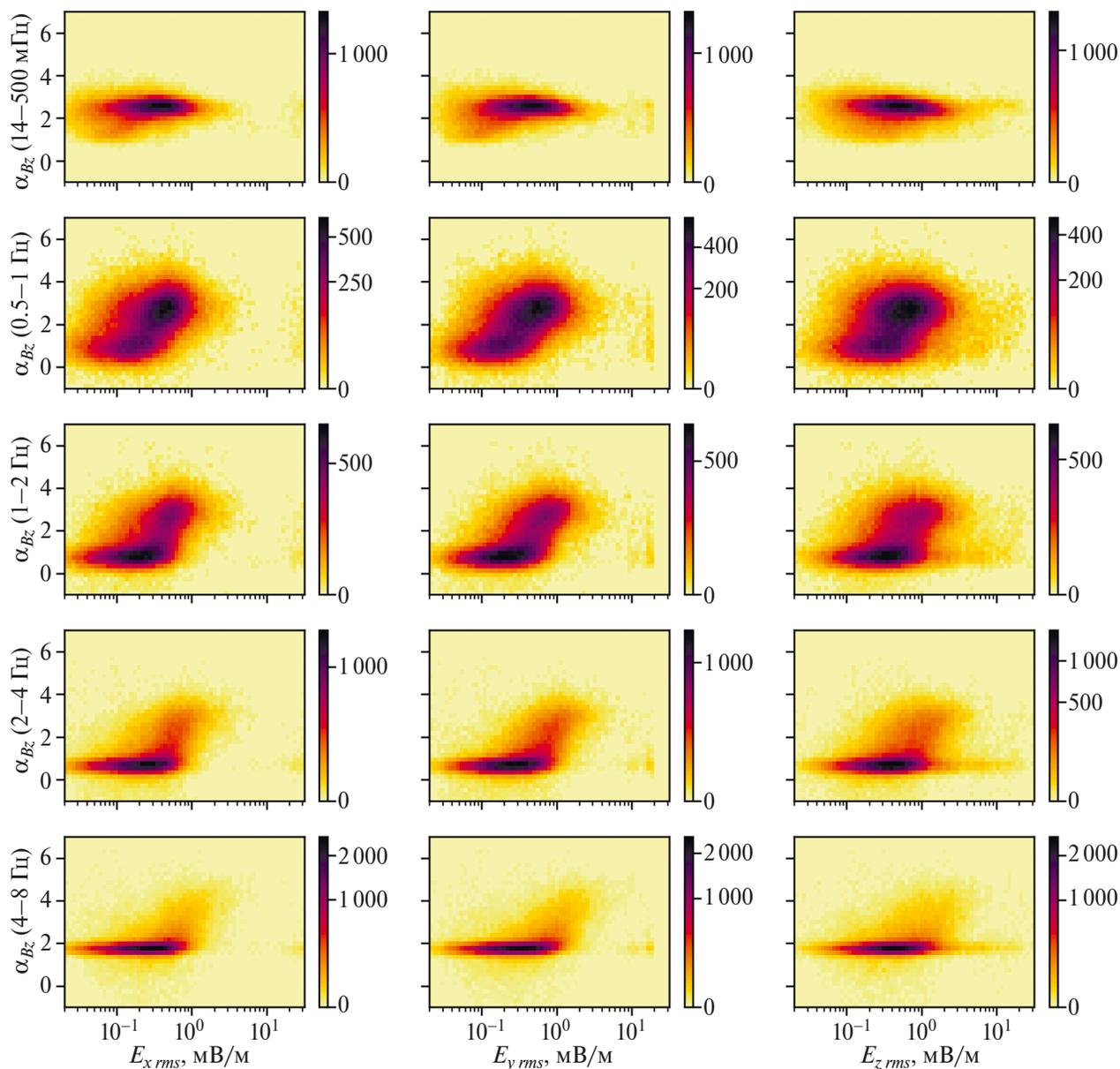


Рис. 9, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов z-компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент электрического поля. Цветом показано количество случаев.

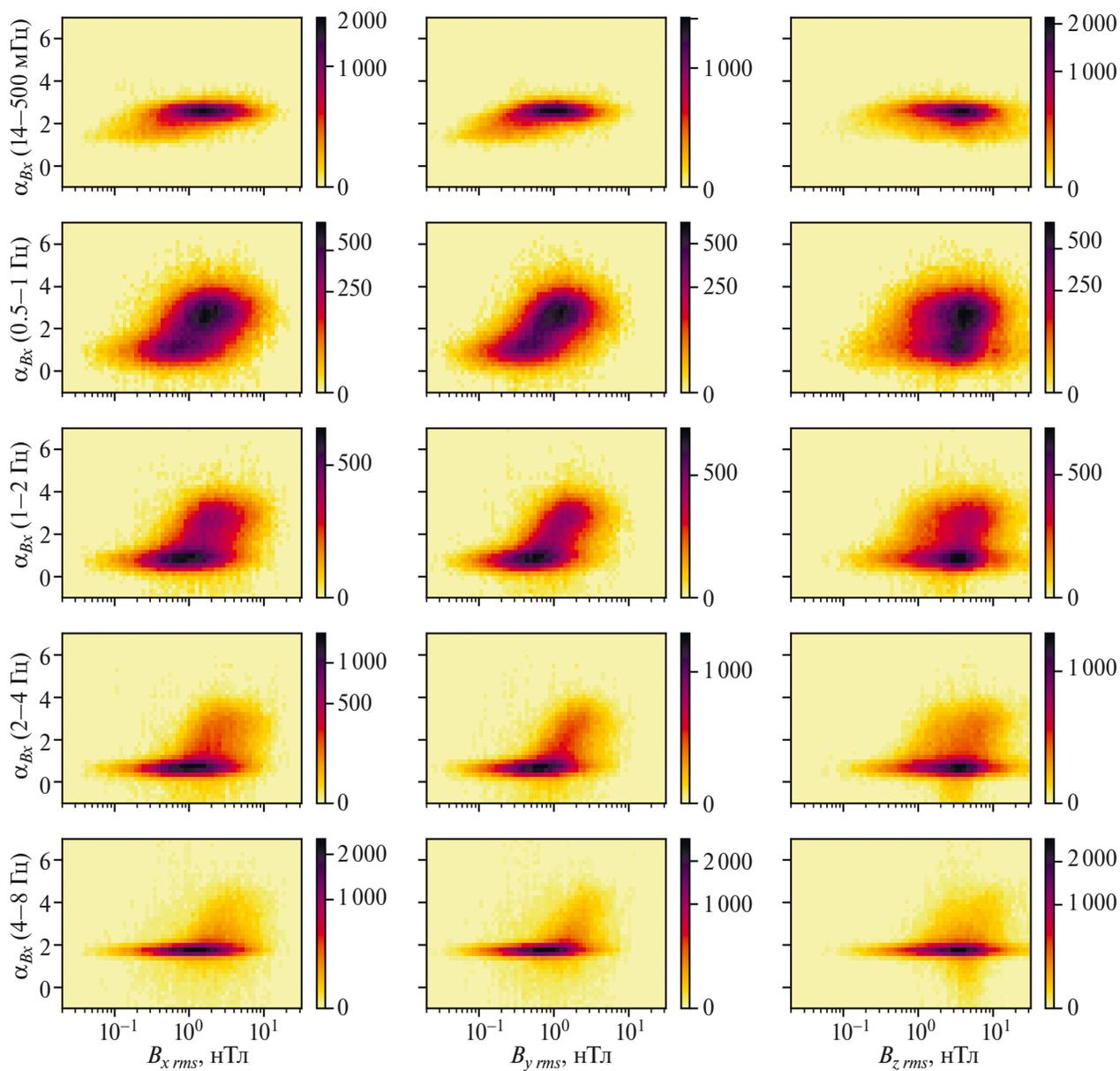


Рис. 10. П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов x-компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.

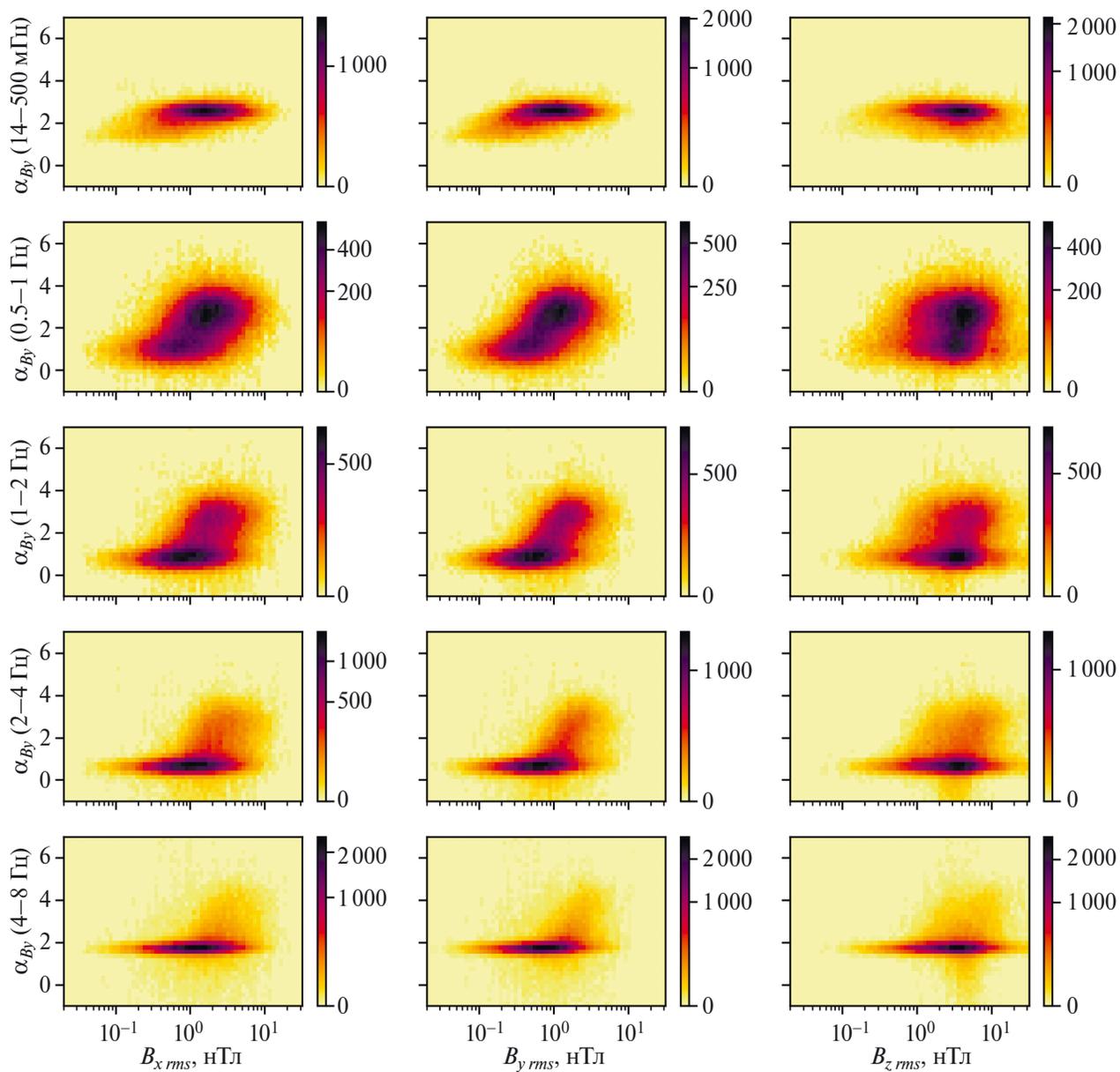


Рис. 11, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов у-компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.

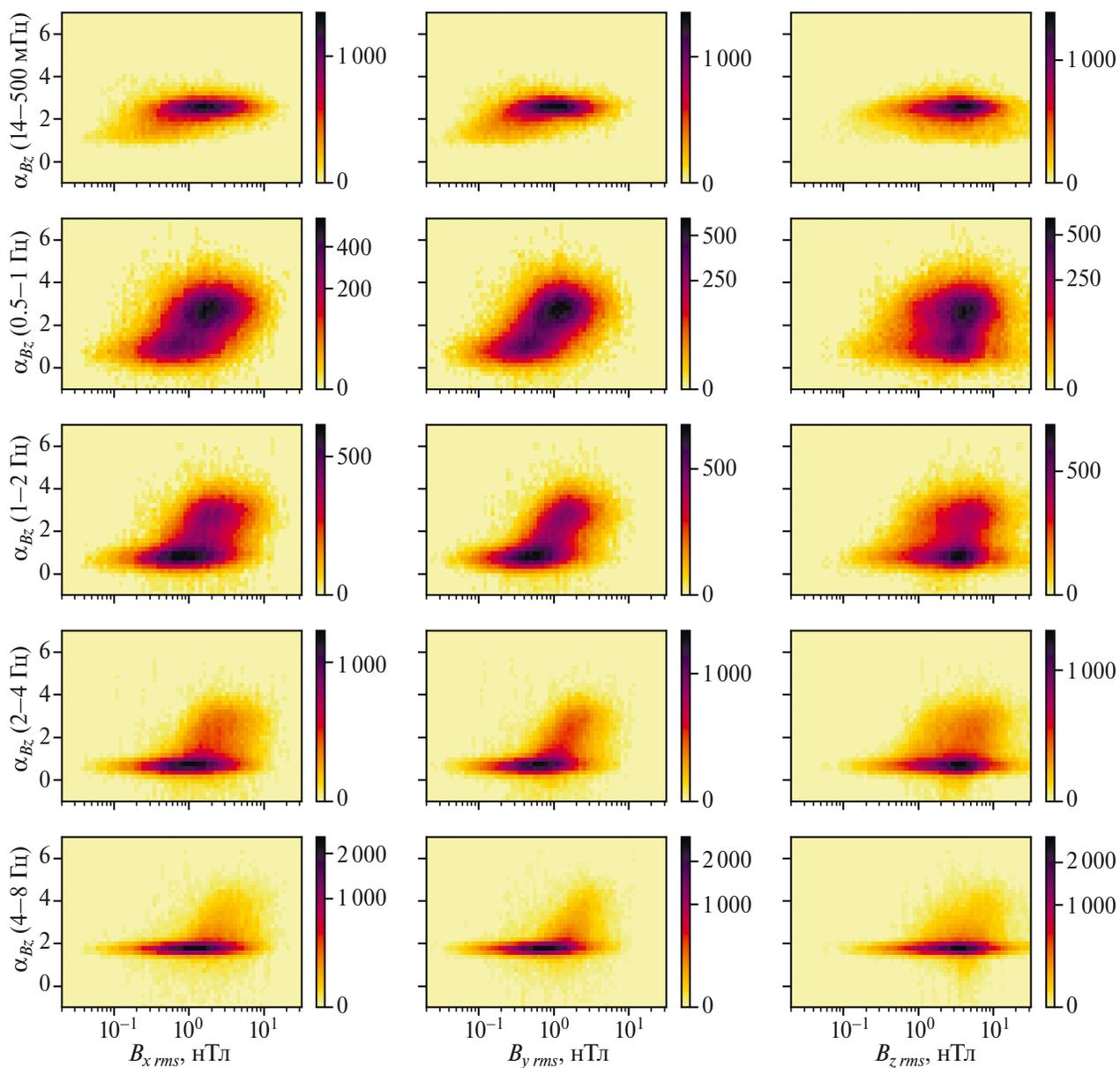


Рис. 12, П1. Двумерные гистограммы зависимости спектральных индексов z-компоненты магнитного поля от уровня флуктуаций компонент магнитного поля. Цветом показано количество случаев.