

Оценка однородности ряда *aa* индексов геомагнитной активности при смене станций наблюдения

Р. Лукьянова^{1,2} и К. Мурсула³

Получено 20 мая 2011 г.; принято 22 мая 2011 г.; опубликовано 7 июня 2011 г.

В некоторых недавних исследованиях было показано, что ряд геомагнитного *aa* индекса неоднороден и имеет слишком большой положительный тренд (около 12 нТл с 1868 г. по настоящее время). Было высказано предположение, что *aa* индекс мог быть искусственно смещен на несколько нТл в момент перехода от станции Абингер к станции Хартленд в 1957 г. из-за недостаточно корректной перекалибровки. В данной работе проведен детальный анализ распределения значений *aa* индекса и показано, что ряд не является однородным, но включает в себя систематическое сдвиги в распределении 3-часовых значений *aa* при каждой смене станции в 1920, 1926, 1957 и 1980 гг. Однако изменения *aa* индекса в различных диапазонах геомагнитной активности остаются гладкими при всех переходах от одной станции к другой. Сдвиги в распределении индивидуальных значений индекса по знаку и величине соответствуют фазе солнечного цикла в момент смены станций. Таким образом, представляется маловероятным, что большой вековой тренд *aa* индекса является следствием некорректной оценки калибровочных коэффициентов. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геомагнитная активность; долговременные изменения.

Ссылка: Лукьянова, Р. и К. Мурсула (2011), Оценка однородности ряда *aa* индексов геомагнитной активности при смене станций наблюдения, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ5003, doi:10.2205/2011NZ000105.

1. Введение

Временной ряд геомагнитного *aa* индекса является одним из самых длинных среди индикаторов солнечной активности. Он был рассчитан по 3-часовым *K* индексам двух антиподальных станций умеренных широт [Mayaud, 1972]. *K* индексы являются производными данных магнитных наблюдений, которые обработаны в соответствии со стандартной процедурой, включая удаление спокойной солнечной вариации. При усреднении индексов, полученных в противоположных полушариях, сглаживается сезонная вариация. Хорошо известно, что ряд *aa* индекса имеет долговременный положительный тренд, так что его рост за последнее столетие составляет примерно 65%. Вероятно, это обусловлено долговременными вариациями солнечной активности, например [Clilverd et al., 1998; Demetrescu and Dobrica, 2008; Feynman and Crooker, 1978;

Jarvis, 2005; Lockwood et al., 1999; Russell, 1975; Stamper et al., 1999].

Однако в процессе разработки новых методов и альтернативных мер геомагнитной активности обнаружилось количественное расхождение в величине вековых трендов *aa* индекса и новых индексов [Clilverd et al., 2002, 2005; Mursula et al., 2004; Mursula and Martini, 2007; Svalgaard and Cliver, 2005, 2007; Jarvis, 2005; Martini and Mursula, 2008]. Mursula and Martini [2007] представили доказательства, что вековой тренд глобальной геомагнитной активности составляет лишь около половины того, что дает *aa* индекс. Было высказано предположение, что *aa* индекс был не вполне корректно откалиброван в точках сопряжения тогда, когда одна из станций заменялась на другую (порядок смены станций, по данным которых рассчитывался *aa* индекс, приведена в Табл. 1). В точке сопряжения данных станций Абингер и Хартланд в 1957 году *aa* индекс мог быть искусственно увеличен на 2–3 нТл. Для проверки калибровки *aa* индекса были использованы индексы межчасовой (IHV) и межсуточной (IDV) изменчивости, сравнение с которыми показало хорошее совпадение вариаций, но уровень *aa* индекса, начиная с 1957 года, отличался от других индексов приблизительно на 3 нТл [Svalgaard and Cliver, 2007; Svalgaard et al., 2004].

Таким образом, временной ряд *aa* индекса может быть

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, С.-Петербург, Россия

²Также Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Университет Оулу, Оулу, Финляндия

Табл. 1. Три *aa* станции в северном и южном полушариях, периоды их работы и коэффициенты нормализации, полученные *Mayaud* [1973]

Станция	МАГА код	Период действия	Коэффициент
Гринвич	GRW	1868–1925	1,007
Абингер	ABN	1926–1956	0,934
Хартленд	HAD	1957–	1,059
Мельбурн	MEL	1868–1919	0,967
Туланги	TOO	1920–1979	1,033
Канберра	CNB	1980–	1,084

неоднородным и содержать некие скачки, связанные, в первую очередь, с неточностями перекалибровки в годы смены станций. Вопрос о возможной корректировке *aa* индекса (который является одним из официальных индексов Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики – МАГА) был поставлен на заседании соответствующей Рабочей группы на Генеральной ассамблее МАГА в 2007 г. в связи с возникшими разногласиями по поводу достоверности ряда и величины тренда. Поскольку *aa* индекс является уникальным инструментом исследования долговременных изменений солнечной и геомагнитной активности, любая возможная корректировка должна быть очень осторожной, и прежде чем предпринимать что-либо в этом направлении, необходимо провести подробный анализ и выявить точки разрывов, если таковые имеются. Задача усложняется тем, что в настоящее время оригинальные аналоговые записи магнитометров станций недоступны и не оцифрованы. Однако можно предположить, что неточности калибровки, особенно во время большого скачка в 1957 г., могут быть обнаружены (либо не обнаружены, если калибровка *Mayaud* проведена корректно) и в самих значениях *aa* индекса. В данной статье, основанной на работе [Lukianova et al., 2009], представлен анализ детального распределения всех значений *aa* индекса и их временной эволюции. Анализ позволяет выявить периоды, когда в ряду значений индекса имеются разрывы (сдвиги), и оценить их величину. Значительные изменения в распределении значений *aa* происходили в 1920, 1926, 1957 и 1980 гг., т.е. в годы, когда одна станция либо в северном, либо в южном полушарии заменялась на другую. Изменения распределения возникали в результате применения коэффициентов нормализации (Табл. 1), которые увязывали между собой данные двух (предыдущей и последующей) станций. В данной работе рассмотрены изменения распределения *aa* в каждом из четырех сдвигов и их соотношение с ходом солнечного цикла.

2. Распределение частоты появления значений *aa* индекса

Трехчасовые значения *aa* индекса взяты с сайта Международной службы геомагнитных индексов (http://isgi.cetr.ipsl.fr/des_aa.htm). Среднегодовые значения *aa* ин-

декса и числа солнечных пятен с 1868 по 2007 гг. приведены, соответственно, на Рис. 1а и Рис. 1б. Можно видеть, что на фоне положительного тренда, приводящего к общему увеличению индекса на ~ 12 нТл за 140 лет, он, в целом, следует вариации солнечного цикла. Чтобы проследить долговременную стабильность *aa* индекса за период 1868–2007 гг., было вычислено количество появлений каждого 3-часового значения *aa* за год, начиная с самого низкого $aa = 2$ нТл и до максимального $aa = 715$ нТл (очевидно, что один год содержит 2920 или 2928 значений индекса). На Рис. 2 представлено число значений *aa* от 2 до 200 нТл в каждом году. Более высокие значения *aa* не показаны из-за малой частоты появления. Для лучшего визуального восприятия Рис. 2 разделен на четыре блока, соответствующие диапазонам $aa \leq 25$ и $26 \leq aa \leq 50$ (Рис. 2а), $51 \leq aa \leq 100$ (Рис. 2б) и $101 \leq aa < 200$ нТл (Рис. 2в), на которых хорошо видно временную эволюцию каждого значения. Поскольку *aa* индекс является квази-логарифмическим продуктом десяти возможных *K* индексов станций, в каждый момент времени может существовать самое большее 100 различных значений *aa*. Этим объясняются пробелы между уровнями, т.е. то, что *aa* никогда не принимает некоторые значения, например 4, 10, 14, 21 и т.д.

На Рис. 2а, Рис. 2б и Рис. 2в можно четко выделить четыре сдвига в распределении частоты появления определенного значения *aa* индекса. В 1920 г. (Мельбурн заменен на Туланги) наблюдается сдвиг вверх, вследствие чего появляются новые, несколько более высокие значе-

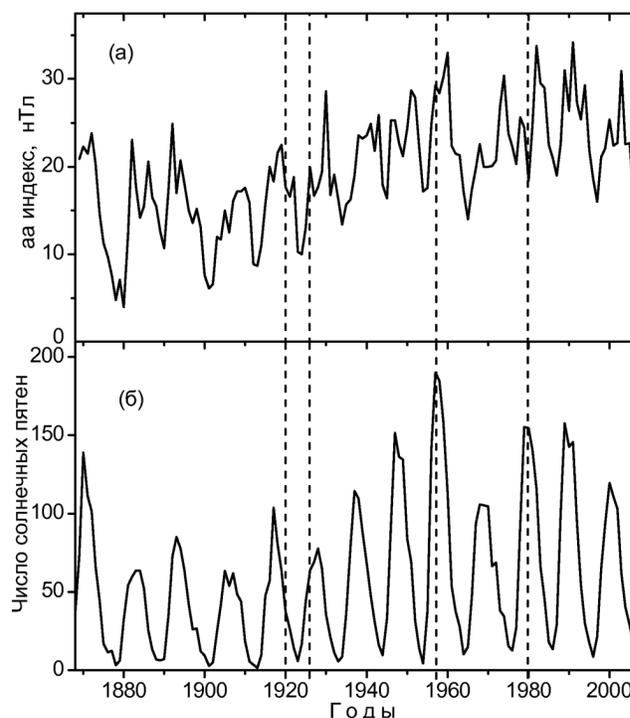


Рис. 1. Среднегодовые значения (а) *aa* индекса и (б) числа солнечных пятен за период 1868–2007 гг. Вертикальными пунктирными линиями отмечена смена станций.

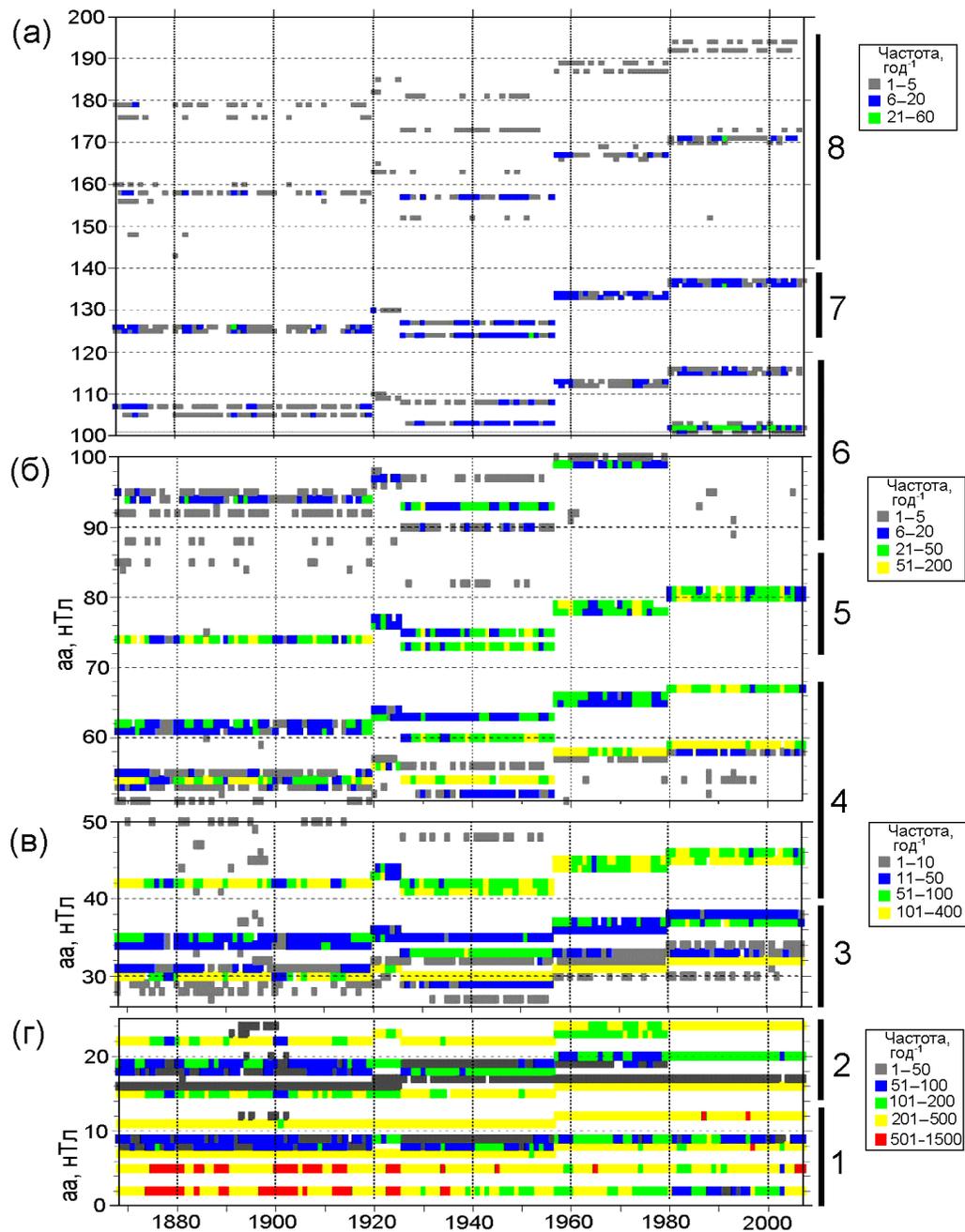


Рис. 2. Эволюция частоты появления 3-часовых значений *aa* (до 200 нТл) в 1868–2007 гг. Частота появления определенных значений *aa* обозначена цветовой шкалой. Рисунок разделен на части в соответствии с уровнями геомагнитной активности: (а) $101 \leq aa < 200$, (б) $51 \leq aa < 100$, (в) $26 \leq aa < 50$ и (г) $aa \leq 25$ нТл. Восемь категорий *aa* индекса (см. текст) обозначены толстыми вертикальными линиями с правой стороны графиков: (1) $aa \leq 13$, (2) $14 \leq aa \leq 25$, (3) $26 \leq aa \leq 39$, (4) $40 \leq aa \leq 69$, (5) $70 \leq aa \leq 86$, (6) $87 \leq aa \leq 120$, (7) $121 \leq aa \leq 139$ и (8) $140 \leq aa \leq 198$ нТл.

ния *aa*, а более низкие значения пропадают. В 1926 г. (Абингер–Гринвич) происходит сдвиг вниз, а в 1957 г. (Хартленд–Абингер) и 1980 г. (Туланги–Канберра) – опять сдвиг вверх. В остальное время не наблюдается разрывов в частоте появления определенных значе-

ний *aa*. При рассмотрении Рис. 2 создается впечатление, что самый большой скачок произошел на рубеже 1956 и 1957 гг., когда уровни значений *aa* смещаются на несколько нТл вверх, причем величина сдвига растет приблизительно линейно с увеличением значений *aa* индекса.

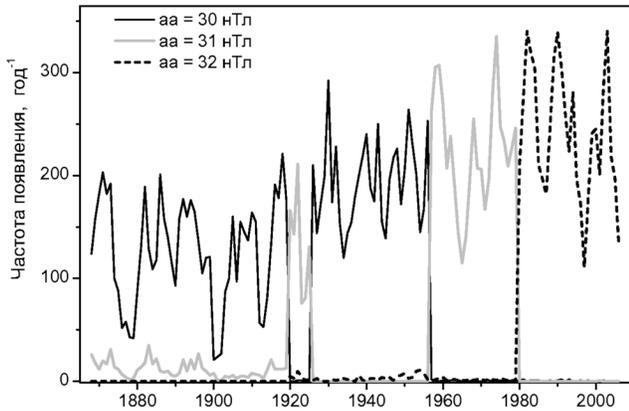


Рис. 3. Эволюция частоты появления $aa = 30, 31$ и 32 нТл в 1868–2007 гг.

На Рис. 3 представлен пример эффекта калибровки в трех последовательных значениях $aa = 30, 31$ и 32 нТл. С 1868 по 1919 и с 1926 по 1956 гг. значение $aa = 30$ нТл является доминирующим, в период 1920–1925 гг. количество таких значений значительно снижается, а в 1957 г. почти исчезает. Значение $aa = 31$ нТл встречается достаточно редко до 1920 г., доминирует в 1920–1925 гг., затем оно полностью исчезает, затем появляется в 1957 г. и снова исчезает в 1980 г. Следующее значение $aa = 32$ нТл впервые появляется в 1920 г., но встречается очень редко, а в 1980 г. оно становится доминирующим. Эти три значения aa являются типичными для средне-возмущенных геомагнитных условий, и можно видеть, что они имеют положительный вековой тренд, аналогичный самому индексу. Они также следуют вариации солнечных циклов (см. Рис. 1).

Распределение значений aa , показанное на Рис. 2 и Рис. 3, является следствием применения калибровочных нормализующих коэффициентов (Табл. 1), которые были получены Мауанд при стыковке данных предшествующей и последующей станций. Все коэффициенты несколько различаются, хотя и остаются близкими к единице. Когда они применяются к значениям A_K (полученным по десяти значениям K индексов), то каждая станция будет иметь несколько иной набор возможных значений исправленных A_K , что приводит к появлению и исчезновению некоторых значений aa . Чем больше коэффициент между “старой” и “новой” станциями, тем больше сдвиг соответствующих уровней aa индекса на Рис. 2. Поскольку каждый раз менялась только одна станция, то эффекты в северном и южном полушариях не накладывались друг на друга.

3. Оценка влияния сдвига 3-часовых значений на среднегодовую величину aa

Рассмотрим более подробно, насколько изменяется среднегодовая величина aa индекса при каждом сдвиге,

связанном со сменой станции. Сначала рассчитаем вклад всех возможных значений aa в среднегодовую величину, умножив каждое 3-часовое значение на число его появлений и разделив полученный результат на общее количество индексов за год. Обозначим этот вклад как $aa(i, j)$, где i – год (от 1868 до 2007) и j – возможные значения 3-часовых aa (от 2 до 715 нТл). Очевидно, что сумма по всем j дает годовой aa индекс. Затем оценим изменения $aa(i, j)$ в каждом из четырех сдвигов. Так, разность $\delta 1(j) = aa(1920, j) - aa(1919, j)$ соответствует изменению вклада j -го значения индекса в сдвиге между 1919 и 1920 гг., когда станция Мельбурн была заменена на станцию Туланги. Разности $\delta 1(j)$, $\delta 2(j)$, $\delta 3(j)$ и $\delta 4(j)$ в сдвигах 1920, 1926, 1957 и 1980 гг. представлены на Рис. 4. Можно видеть, что хотя величина δ гораздо меньше единицы, есть несколько значений, вклад которых в среднегодовую величину aa изменяется значительно. Так, для $aa = 20 - 40$ нТл, которые встречается наиболее часто, величина δ составляет 2 – 3 нТл. Например, в 1920 г., когда значение $aa = 42$ нТл полностью исчезает (Рис. 2а), величина $\delta 1(42)$ равна приблизительно -3 нТл. В то же время разности $\delta 1(43)$ и $\delta 1(44)$ положительны, т.к. в 1920 г. значения $aa = 43$ и 44 нТл, напротив, только появляются.

По своему определению aa индекс не может принимать любые значения. Например, полностью отсутствуют значения $aa = 13, 14$ или 25 нТл (пустые линии на Рис. 2). Пользуясь этим, все значения aa можно разделить на категории (диапазоны), соответствующие различным уровням геомагнитной активности, и рассмотреть вклад каждой категории в среднегодовую величину индекса. Во время смены станций aa , хотя и смещается от одного значения к другому, но остается внутри определенной категории. Было выделено девять категорий: (1) $aa \leq 13$, (2) $14 \leq aa \leq 25$, (3) $26 \leq aa \leq 39$, (4) $40 \leq aa \leq 69$, (5) $70 \leq aa \leq 86$, (6) $87 \leq aa \leq 120$, (7) $121 \leq aa \leq 139$, (8) $140 \leq aa \leq 198$ и (9) $199 \leq aa \leq 715$ нТл. На Рис. 2 категории обозначены вертикальными толстыми линиями и номерами (от 1 до 8) с правой стороны графиков. Рис. 5а показывает, какова величина вклада каждой из девяти категорий в изменение годового aa индекса при первой смене станции в 1919/20 гг. Можно видеть, что в 1919 г. наибольший вклад дает четвертая категория, а в 1920 г. – вторая. Кроме того, во время этого сдвига все категории, за исключением первой, дают отрицательный вклад. Интересно отметить, что визуальный образ сдвига на Рис. 2 воспринимается как скачок индекса в сторону увеличения, тогда как Рис. 5а показывает, что увеличение количества значений aa , принадлежащих к категории 1, приводит к реальному уменьшению среднегодовой величины. Вклад каждой категории в годовой aa индекс в каждом из четырех случаев смены станций представлен на Рис. 6. Можно выделить два типа изменения распределения значений индекса по категориям. В 1920 и 1980 гг. только первая категория дает положительный вклад в годовой aa , а остальные категории дают отрицательный вклад. В 1926 и 1957 гг., наоборот, отрицательный вклад дает только одна категория (первая и седьмая, соответственно, в 1926 и 1957 г.), тогда как остальные дают положительный вклад.

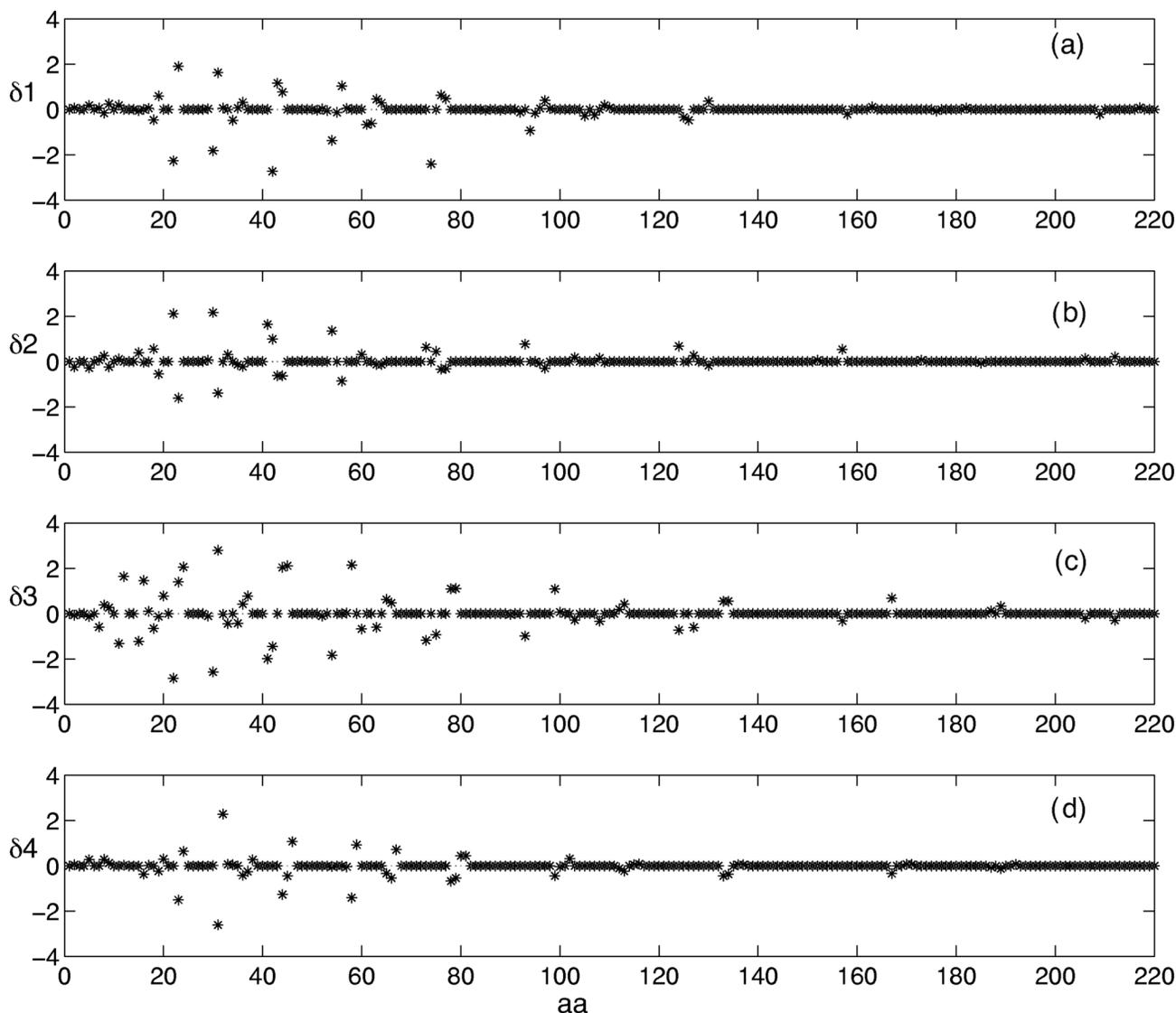


Рис. 4. Разности $\delta 1(j)$, $\delta 2(j)$, $\delta 3(j)$ и $\delta 4(j)$ (в нТл) для каждого значения aa от $j = 2$ до 220 нТл при смене станции в 1920, 1926, 1957 и 1980 гг. (сверху вниз).

Просуммировав вклады отдельных категорий, можно получить общее изменение годового aa индекса при каждом сдвиге. Оно составляет $-4,9$; $6,8$; $4,6$ и $-4,2$ нТл, соответственно, в 1920, 1926, 1957 и 1980 гг. Таким образом, в сдвигах 1920 и 1980 гг. среднегодовая величина aa уменьшается, а в 1926 и 1957 гг. – увеличивается. Этот результат находится в кажущемся противоречии с тем, что представлено на Рис. 2. Действительно, в 1926 г., когда применяется нормализующий коэффициент $0,93$ (см. Табл. 1), имеет место скачок 3-часовых значений вниз. В то же время, годовое значение aa увеличивается на $6,8$ нТл. Однако большой сдвиг вверх в 1926 г. ($6,8$ нТл) и немного меньший сдвиг в 1957 г. ($4,6$ нТл) происходят в период увеличения солнечной активности в фазе роста 16 и 19-го солнечного цикла (Рис. 16). Уменьшение среднегодовой величины aa в 1920 г., несмотря на примене-

ние повышающего коэффициента $1,033$ (Табл. 1), определяется началом фазы спада 15-го солнечного цикла. Таким образом, в 1920 и 1926 гг. величина нормализующего коэффициента (т.е. больше он или меньше единицы) и солнечная активность (т.е. рост или спад 11-летнего цикла) находятся в противофазе, а в 1957 и 1980 гг. – в фазе. Коэффициент нормализации для Хартленда был найден вполне корректно и не приводит к какому-либо искусственному завышению годового aa индекса в 1957 г. вблизи максимума высокого солнечного цикла. В 1980 г. уменьшение индекса на $4,2$ нТл происходит в самом начале спада 21-го цикла и может казаться слишком большим. Однако, даже если коэффициент нормализации для Канберры и взят слишком низким, это приводит к уменьшению, но никак не к искусственному завышению долговременного положительного тренда aa индекса.

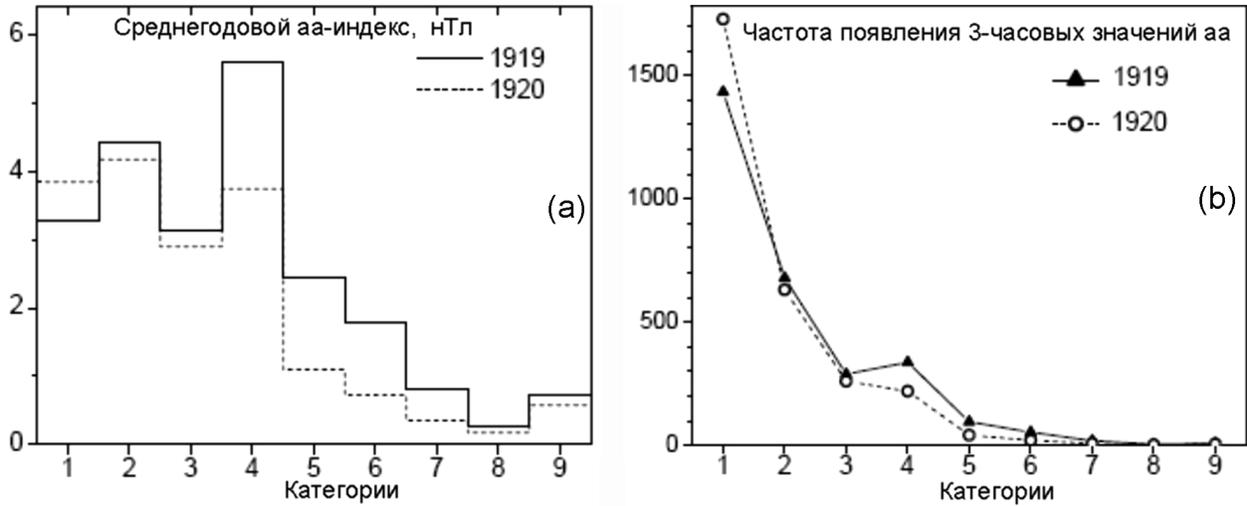


Рис. 5. Вклад каждой категории *aa* индекса в среднегодовую величину в 1919 и 1920 гг. (а) и частота появления 3-часовых значений в каждой категории (б).

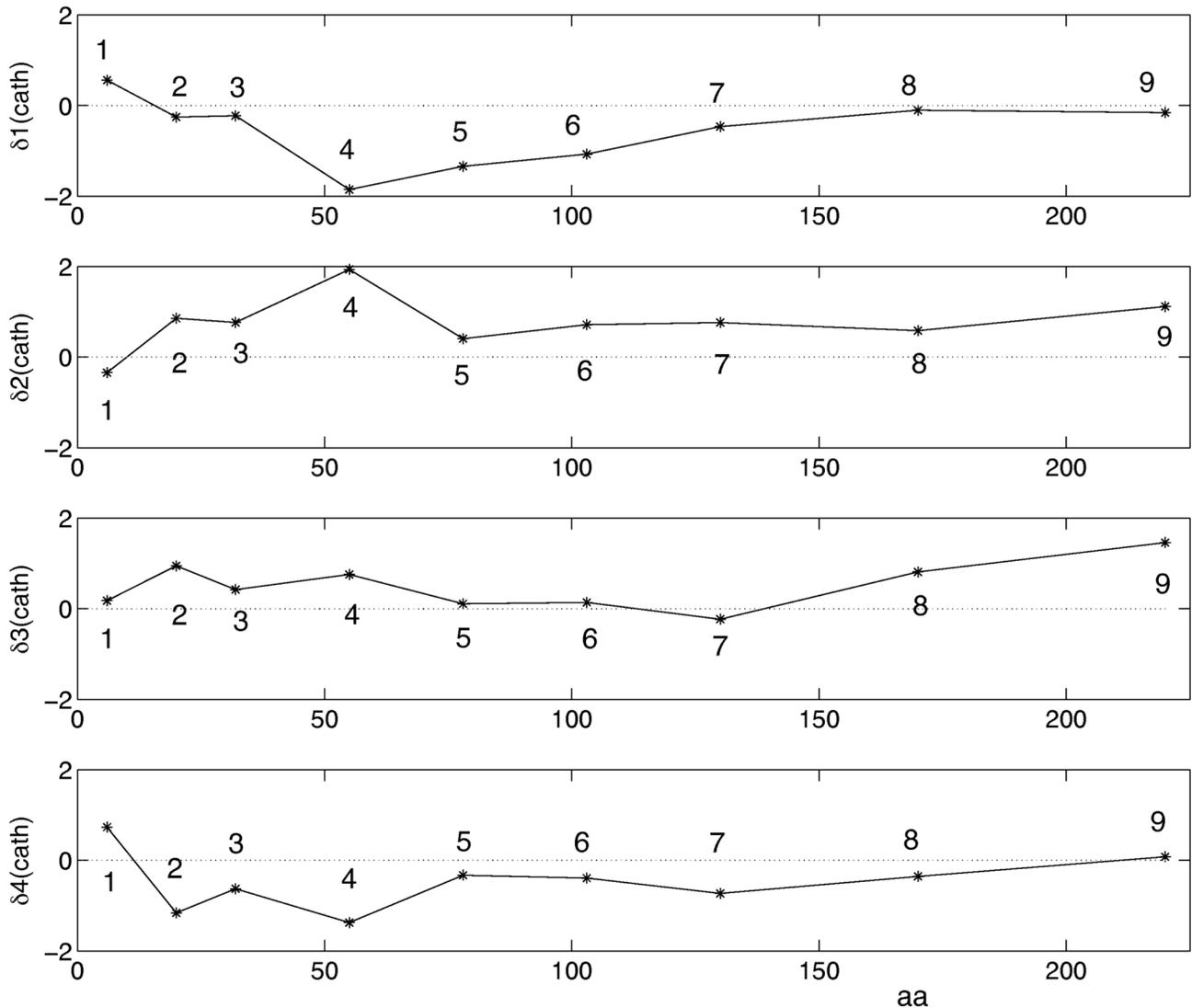


Рис. 6. Вклад каждой категории в годовой *aa* индекс при смене станций в 1920, 1926, 1957 и 1980 гг.

4. Заключение

Самый длинный из имеющихся рядов геомагнитной активности более чем 150-летний ряд *aa* индекса является исключительно важным источником информации о долговременных изменениях в геомагнитном поле, околоземном пространстве и на Солнце. Корректность этого ряда имеет исключительное значение. Ряд *aa* индекса был ретроспективно получен *Mayaud* [1972, 1973] по данным нескольких среднеширотных станций северного и южного полушарий. В связи с тем, что в последнее время в научной литературе были высказаны предположения, что *aa* индекс имеет слишком большой положительный вековой тренд, который мог быть искусственно привнесён (особенно в 1957 г.) из-за неточной перекалибровки при переходе от одной станции к другой, в нашей работе проанализированы все четыре смены станций в 1920, 1926, 1957 и 1980 гг. Получено, что хотя введение нормализующих коэффициентов сильно влияет на распределение индивидуальных значений *aa*, их вклад в годовой *aa* индекс в пределах определенных диапазонов геомагнитной активности изменяется без каких-либо скачков. В трех случаях (1920, 1925 и 1980 гг.) наибольший вклад вносят значения $aa = 40 - 70$ нТл, типичные для условий средней возмущенности. В 1957 г. основной вклад вносят более высокие значения *aa*. Это обусловлено тем, что в последнем случае был введен самый большой по сравнению с другими нормализующий коэффициент (1,1338 в 1957 г., 1,0683 в 1920 г., 0,9275 в 1926 г. и 1,0494 в 1980 г.). Однако этот коэффициент соответствовал высоте максимума солнечного цикла, во время которого происходила смена станций в 1957 г. Остальные коэффициенты также учитывали фазу солнечного цикла. Анализ изменения распределения значений *aa* индекса показал, что коэффициенты нормализации рассчитаны и применены в [*Mayaud*, 1972, 1973] вполне корректно. Таким образом, нет очевидных доказательств того, что слишком большой рост *aa* индекса в течение XX века может быть связан с ошибками в калибровке. Возможность искусственного увеличения годового *aa* индекса на ~ 3 нТл в 1957 г. следует признать маловероятной. Поэтому тот факт, что *aa* индекс показывает более значительный рост за столетие по сравнению с другими глобальными или локальными среднеширотными индексами [*Martini and Mursula*, 2008] может быть обусловлен некоторыми другими факторами, выявить которые необходимо в будущем. Среди этих факторов могут быть как технические, например, некорректное определение нулевого уровня в аналоговых магнитограммах, так и связанные с природой геомагнитной активности. В любом случае, цифровые данные высокого разрешения необходимы для обеспечения более детального изучения *aa* индекса.

Литература

- Clilverd, M. A., T. D. G. Clark, E. Clarke, H. Rishbeth (1998), Increased magnetic storm activity from 1868 to 1995, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *60*, 1047–1056, doi:10.1016/S1364-6826(98)00049-2.
- Clilverd, M. A., T. D. G. Clark, E. Clarke, H. Rishbeth, T. Ulich (2002), The causes of long-term changes in the *aa* index, *J. Geophys. Res.*, *107*, A12, 1441, doi:10.1029/2001JA000501.
- Clilverd, M. A., E. Clarke, T. Ulich, J. Linthe, H. Rishbeth (2005), Reconstructing the long-term *aa* index, *J. Geophys. Res.*, *110*, A07205, doi:10.1029/2004JA010762.
- Demetrescu, C., V. Dobrica (2008), Signature of Hale and Gleisberg solar cycles in the geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, *113*, A02103, doi:10.1029/2007JA012570.
- Feynman, J., N. U. Crooker (1978), The solar wind at the turn of the century, *Nature*, *275*, 626–627, doi:10.1038/275626a0.
- Jarvis, M. J. (2005), Observed tidal variation in the lower thermosphere through the 20th century and the possible implication of ozone depletion, *J. Geophys. Res.*, *110*, A04303, doi:10.1029/2004JA010921.
- Lockwood, M., R. Stamper, M. N. Wild (1999), A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years, *Nature*, *399*, 437–439, doi:10.1038/20867.
- Lukianova, R., G. Alekseev, K. Mursula (2009), Effects of station relocation in the *aa* index, *J. Geophys. Res.*, *114*, A02105, doi:10.1029/2008JA013824.
- Martini, D., K. Mursula (2008), Centennial geomagnetic activity studied by a new, reliable long-term index, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *70*, 1074–1087, doi:10.1016/j.jastp.2008.01.008.
- Mayaud, P. N. (1972), The *aa* indices: A 100-year series characterizing the magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, *77*, 6870–6874, doi:10.1029/JA077i034p06870.
- Mayaud, P. N. (1973), A hundred year series of geomagnetic data 1868–1967, indices *aa*, storm sudden commencements, *IAGA Bull.*, *33*, 251, Int. Union of Geod. and Geophys. Publ. Off., Meppel, Netherlands.
- Mursula, K., D. Martini (2007), A new verifiable measure of centennial geomagnetic activity: Modifying the *K* index method for hourly data, *Geophys. Res. Lett.*, *34*, L22107, doi:10.1029/2007GL031123.
- Mursula, K., D. Martini, A. Karinen (2004), Did open solar magnetic field increase during the last 100 years? A reanalysis of geomagnetic activity, *Sol. Phys.*, *224*, 85–94, doi:10.1007/s11207-005-4981-y.
- Russell, C. T. (1975), On the possibility of deducing interplanetary and solar parameters from geomagnetic records, *Sol. Phys.*, *42*, 1, 259–269, doi:10.1007/BF00153301.
- Stamper, R., M. Lockwood, M. N. Wild, T. D. G. Clark (1999), Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, *104*, 28,325–28,342, doi:10.1029/1999JA900311.
- Svalgaard, L., E. W. Cliver, P. Le Sager (2004), IHV: A new long-term geomagnetic index, *Adv. Space Res.*, *34*, 2, 436–439.
- Svalgaard, L., E. W. Cliver (2005), The IDV index: Its derivation and use in inferring long-term variations of the interplanetary magnetic field strength, *J. Geophys. Res.*, *110*, A12103, doi:10.1029/2005JA011203.
- Svalgaard, L., E. W. Cliver (2007), Interhourly variability index of geomagnetic activity and its use in deriving the long-term variation of solar wind speed, *J. Geophys. Res.*, *112*, A10111, doi:10.1029/2007JA012437.

Р. Лукьянова, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия.
(renata@aari.nw.ru)

К. Мурсула, Университет Оулу, Оулу, Финляндия