

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА НА ОСНОВЕ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ

А.Б. Кондратьев, Ю.В. Пенских, С.Б. Лунюшкин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
sky1net@iszf.irk.ru

## AUTOMATED METHOD FOR DETERMINING AURORAL OVAL BOUNDARIES, BASED ON THE MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE

A.B. Kondratiev, Yu.V. Pensikh, S.B. Lunyushkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

---

**Аннотация.** Разработан оригинальный метод автоматизированного определения границ аврорального овала на основе карт эквивалентной токовой функции и продольных токов, рассчитываемых в программном комплексе ТИМ (техника инверсии магнитограмм) в приближении однородной проводимости ионосферы. В новом методе определяются: граница обращения ионосферной конвекции, высокоширотная (полярная шапка) и низкоширотная границы аврорального овала, линии максимума плотности продольных токов в зонах I и II Ииджимы–Потемры и граница между этими зонами (линия максимума авроральных электроджетов). Указанные параметры ранее определялись вручную – визуальным анализом карт продольных и эквивалентных токов, что занимало очень много времени (недели и месяцы). Сравнение границ, полученных ручным и автоматизированным методами, показало, что коэффициент корреляции между двумя границами составляет в среднем 0.85, а среднеквадратичное отклонение не превышает 2–3° по широте. Обеспечивая достаточную точность определения границ, автоматизированный метод сокращает время обработки карт на 2–3 порядка (до минут и часов), освобождая исследователя от трудоёмкой визуальной работы. Новый метод реализован как один из важных блоков в модернизированном комплексе программ ТИМ.

**Ключевые слова:** ионосферная конвекция, эквивалентная токовая функция, авроральный овал, полярная шапка, продольные токи, граница обращения конвекции.

**Abstract.** We developed an original method to automatically determine the auroral oval boundaries. The method is based on the maps for equivalent current function and on the maps for field-aligned currents. The maps were calculated within the magnetogram inversion technique (MIT) software in the ionosphere homogeneous conductivity approximation. Through this new method, we determine: 1) the ionospheric convection reversal boundary, 2) the high-latitude (polar cap) and low-latitude boundaries of the auroral oval, 3) the field-aligned current density maximum lines in the Iijima—Potemra regions 1 and 2, and 4) the boundary between these regions (auroral electrojet maximum line). Earlier, these parameters were determined manually, through visually analyzing the maps for field-aligned and equivalent currents, which took plenty of time (weeks and months). Comparing the boundaries obtained manually and automatically showed that the correlation coefficient between two boundaries is, on average, 0.85, and the root-mean-square deviation does not exceed 2–3 degrees latitude. By providing an adequate accuracy for the boundary determination, the automated method reduces the time for map processing by a factor of 2–3 (to minutes and hours), releasing a researcher from laborious visual work. The new method is implemented as one of the relevant modules in the updated MIT software.

**Keywords:** ionospheric convection, equivalent current function, auroral oval, polar cap, field-aligned currents, convection reversal boundary.

---

### Введение

Понятие аврорального овала исторически связано с областью полярных сияний, создаваемых потоками магнитосферных электронов, выпадающих в высокоширотную ионосферу [Akasofu, 2007; Фельдштейн, 2015]. Область овала имеет северную (полярная шапка) и экваториальную границы высыпаний. Основными прямыми методами наблюдений за динамикой овала являются наземные и спутниковые снимки сияний и данные спутников о параметрах спектра выпадающих частиц. На основе наземных снимков разработана AP-Model [Vorobjev, Yagodkina, 2007], на основе спутниковых (images) — модель Milan et al. [2009], данные о частицах по многочисленным пролетам спутников легли в основу модели границ аврорального овала OVATION Prime [Newell et al., 2010].

Исследования динамики границ аврорального овала дают очень важную информацию о физических процессах в магнитосфере, например: увеличение (уменьшение) магнитного потока через полярную шапку определяет накопление (расход) магнитной энергии в долях хвоста; положение экваториальной границы в полуночном секторе показывает размер области, охваченной магнитной бурей или суббурей. Поэтому разработка новых методов диагностики границ аврорального овала по-прежнему является актуальной задачей.

Техника инверсии магнитограмм (ТИМ), разработанная в ИСЗФ СО РАН [Mishin, 1990], обеспечивает расчет 2D-карт распределений эквивалентных токов, электрического потенциала, ионосферных и продольных токов в полярной ионосфере на основе геомагнитных данных мировой сети магни-

тометров. Важной частью метода ТИМ является оригинальная динамическая модель корпускулярной проводимости ионосферы [Mishin et al., 1986], необходимым элементом которой являются границы аврорального овала, которые до сих пор определяются вручную — визуальным анализом карт продольных и эквивалентных токов и рисованием границ овала на экране монитора с помощью мыши. Этот способ обработки карт занимает очень много времени (недели и месяцы) — поэтому в методе ТИМ уже давно назрела необходимость создания такого автоматизированного метода определения основных границ аврорального овала, который заменил бы человека, работал быстро и с точностью, не уступающей визуальному методу.

Таким образом, разработка автоматизированного метода диагностики границ аврорального овала необходима, во-первых, для модернизации комплекса ТИМ, а во-вторых, — это развитие нового наземного метода наблюдений за динамикой аврорального овала.

В настоящей работе в основном решена поставленная задача, приведены первые оптимистичные результаты тестирования “человек–машина”.

### Основные положения метода

#### Граница обращения конвекции

Магнитосферная конвекция состоит из двух крупномасштабных вихрей, образованных движениями плазмы от Солнца в пограничных слоях и в долях магнитного хвоста, и обратно к Солнцу — в плазменном слое. Известно два физических механизма генерации конвекции — пересоединение ММП с магнитным полем Земли на дневной магнитопаузе [Dungey, 1961] и квазивязкое взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой [Axford, Hines, 1961]. Конвекция существует постоянно, т. к. оба механизма обеспечивают непрерывное преобразование кинетической энергии солнечного ветра в электрическую в пограничных слоях магнитосферы по принципу МГД-генератора.

Рис. 1 иллюстрирует квазивязкий механизм генерации магнитосферно-ионосферной конвекции. Скорость плазмы поперек пограничного слоя падает от значения скорости солнечного ветра на внешней границе слоя до нуля на его внутренней границе, а далее растет скорость электрического дрейфа, направленная уже к Земле и создаваемая электрическим полем утро-вечер поперек плазменного слоя. На внутренней границе пограничного слоя достигаются максимальные значения электрических потенциалов и плотностей продольных токов зоны I Ииджимы–Потемры (И-П), которые подобно электропроводам соединяют МГД-генератор с нагрузкой (проводящей ионосферой) и переносят в нее эти электрические потенциалы — в результате возникает ионосферная конвекция, аналогичная магнитосферной.

Согласно изложенного, имеющая ясный физический смысл граница обращения ионосферной конвекции принята нами в качестве ключевого основания метода.

#### Взаимосвязь ионосферной конвекции и токовой функции.

Данное положение теоретически точно в приближении однородной проводимости и радиального

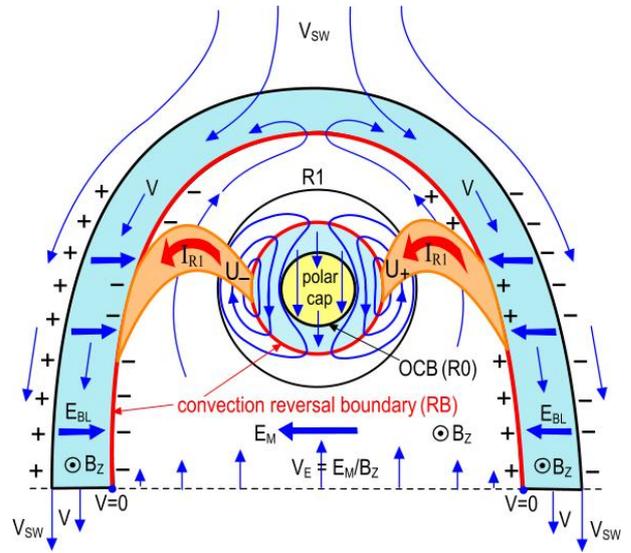


Рис. 1. Граница обращения конвекции (RB) в модели Аксфорда-Хайнса. Обозначения:  $V_{SW}$  — скорость солнечного ветра;  $V$  — скорость в пограничном слое;  $V_E$  — скорость электрического дрейфа;  $B_z$  — вертикальная компонента магнитного поля в хвосте;  $E_{BL}$  — электрическое поле генератора в пограничном слое;  $E_M$  — электрическое поле утро-вечер в магнитосфере;  $U_+$ ,  $U_-$  — электрические потенциалы, переносимые в ионосферу продольными токами ( $I_{R1}$ ) зоны I Ииджимы–Потемры; OCB (R0) — граница открытых/закрытых силовых линий

геомагнитного поля [Kern, 1966] и следует из интегрального закона Ома для поперечного тока:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_p + \mathbf{j}_H = \Sigma_p \mathbf{E} + \Sigma_H \frac{\mathbf{B} \times \mathbf{E}}{B} \quad (1)$$

где  $\mathbf{j}_p$ ,  $\mathbf{j}_H$ ,  $\Sigma_p$ ,  $\Sigma_H$  — линейные плотности токов и интегральные проводимости Педерсена и Холла;  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции геомагнитного поля;  $\mathbf{E}$  — электрическое поле.

С другой стороны, по теореме Гельмгольца, электрический ток в формуле (1) в общем случае есть сумма потенциальной  $\mathbf{j}_{pot}$  и соленоидальной  $\mathbf{j}_{sol}$  частей:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{pot} + \mathbf{j}_{sol} \quad (2)$$

где  $\mathbf{j}_{pot} = \mathbf{j}_p$ ;  $\mathbf{j}_{sol} = \mathbf{j}_H$  и выполняются условия:

$$\text{rot} \mathbf{j}_{pot} = 0; \text{div} \mathbf{j}_{sol} = 0.$$

Также доказано [Kern, 1966; Fukushima, 1976], что наземные геомагнитные вариации создаются в основном током Холла, связанным с эквивалентной токовой функцией  $J$ :

$$\mathbf{j}_{sol} = \mathbf{j}_H = \nabla J \times \mathbf{n} \quad (3)$$

где  $\mathbf{n} = -\frac{\mathbf{B}}{B}$  — внешняя нормаль в северном полушарии.

Учитывая, что  $\mathbf{V} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$  — дрейфовая скорость, а  $\mathbf{E} = -\nabla U$ , где  $U$  — электрический потенциал ионосферы, из второго члена (1) нетрудно получить две простые формулы:

$$\mathbf{j}_H = -\Sigma_H \nabla U \times \mathbf{n} \quad (4)$$

$$\mathbf{j}_H = -(\Sigma_H B_0) \mathbf{V} \quad (5)$$

где  $B_0 = \frac{\mu_0 M_E}{2\pi r^3}$ ;  $M_E$  — магнитный момент Земли;

$r = R_E + h$ ;  $R_E$  — радиус Земли;  $h = 115$  км — приведенная высота токонесущего E-слоя ионосферы.

Из (3) и (4) следует искомая взаимосвязь:

$\nabla J = -\Sigma_H \nabla U$  и, следовательно:

$$J = -\Sigma_H U + \text{const} \quad (6)$$

Таким образом, эквивалентная токовая функция  $J$  с точностью до постоянного множителя ( $-\Sigma_H$ ) и константы является аналогом электрического потенциала ионосферы  $U$  и может быть использована для определения границы обращения ионосферной конвекции.

**Максимум ротора дрейфовой скорости — граница обращения конвекции.**

Это базовое положение вытекает из двух предыдущих и является основой алгоритма для программной реализации всего метода определения границ аврорального овала.

Применяя оператор ротора к формуле (1) и учитывая (2) и (3), после несложных преобразований получим выражение для ротора от поперечного ионосферного тока  $j$ :

$$\text{rot } j = \frac{2}{r} \nabla J - (\Delta J) \mathbf{n} \quad (7)$$

С другой стороны, из (2) и (5) следует:

$$\text{rot } j = \text{rot } j_H = -(\Sigma_H B_0) \text{rot } V \quad (8)$$

В результате из (7) и (8) получаем формулу для ротора дрейфовой скорости:

$$\text{rot } V = \frac{1}{\Sigma_H B_0} \left[ (\Delta J) \mathbf{n} - \frac{2}{r} \nabla J \right] \quad (9)$$

В дипольном геомагнитном поле аналогичная (9) уточненная формула имеет вид:

$$\text{rot } V = \frac{2}{\Sigma_H B_0 \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}} \left[ (\Delta J) \mathbf{n} - \frac{2}{r} \nabla J \right] \quad (10)$$

Таким образом, задача определения границы обращения ионосферной конвекции математически сводится к поиску точек, в которых модуль ротора скорости (10) максимален.

### Программная реализация метода

В основе ТИМ [Mishin, 1990] лежит расчет эквивалентной токовой функции:

$$J = -\frac{10R_E}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{n+1} \left( \frac{R_E+h}{R_E} \right)^n \times (E_n^m \cos(m\lambda) + e_n^m \sin(m\lambda)) P_n^m(\cos\theta), \quad (11)$$

где  $\theta, \lambda$  — геомагнитные коширота и долгота,  $P_n^m$  — присоединенные полиномы Лежандра в нормировке Шмидта,  $E_n^m$  и  $e_n^m$  — коэффициенты сферического гармонического анализа.

Для проведения границы обращения конвекции RB на первом этапе находятся наибольшее и наименьшее значения функции  $J$  (красные точки на рис. 2). Для более точного нахождения границы RB находятся дополнительные опорные точки (зеленые, рис. 2). После этого все точки соединяются линией, проходящей по минимуму модуля градиента токовой функции. Эта линия является искомой границей

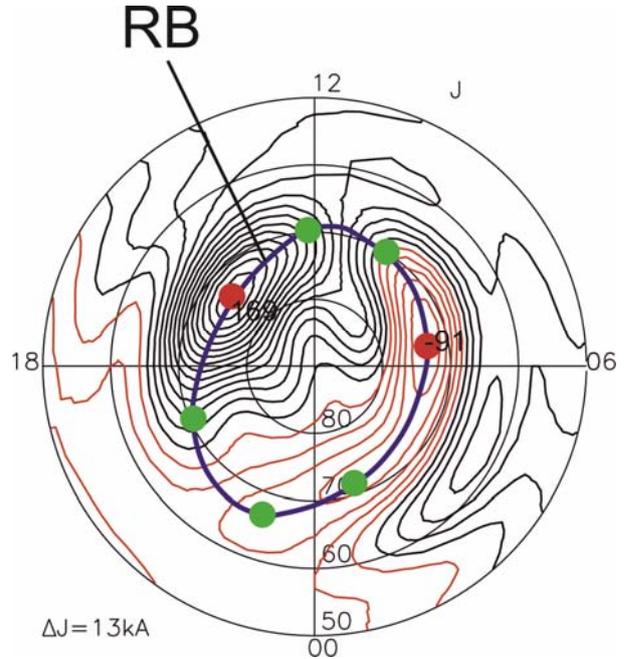


Рис. 2. Типичный пример эквивалентной токовой функции для 03:50 UT 27.08.2001 г. Обозначения: граница обращения ионосферной конвекции (RB) — синяя линия; красные точки — наибольшее и наименьшее значения токовой функции; зеленые — дополнительные опорные точки

RB, а также опорной для нахождения остальных границ аврорального овала — R0, R1 и R2.

Полученная таким образом граница RB переносится на карту продольных токов, которые в приближении [Kern, 1966]  $j = -\frac{\Sigma_p}{\Sigma_H} \Delta J$  рассчитываются по формулам:

$$\Delta J = -\frac{10R_E}{4\pi(R_E+h)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n n(2n+1) \left( \frac{R_E+h}{R_E} \right)^n \times (E_n^m \cos(m\lambda) + e_n^m \sin(m\lambda)) P_n^m(\cos\theta),$$

$$j = \frac{\Sigma_p}{\Sigma_H} \frac{10R_E}{4\pi(R_E+h)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n n(2n+1) \left( \frac{R_E+h}{R_E} \right)^n \times (E_n^m \cos(m\lambda) + e_n^m \sin(m\lambda)) P_n^m(\cos\theta), \quad (12)$$

Рисунок 3 подтверждает вышеизложенную теорию о совпадении границы RB с максимумом плотности продольных токов зоны 1 И-П. Далее, двигаясь от границы RB к югу до широты, где меняется знак продольных токов, получаем границу между продольными токами зон 1 и 2 (граница R1). Получить границу R1 только по карте продольных токов удастся не всегда. Поэтому дополнительно используется карта модуля градиента токовой функции, максимум которого указывает на границу R1. Данный подход позволяет достаточно точно построить границу R1.

Двигаясь дальше к югу от границы R1 до широты, где плотность продольного тока зоны 2 достигает нуля, находим низкоширотную границу аврорального овала R2. Аналогично находится граница полярной шапки R0 при движении к северу от границы

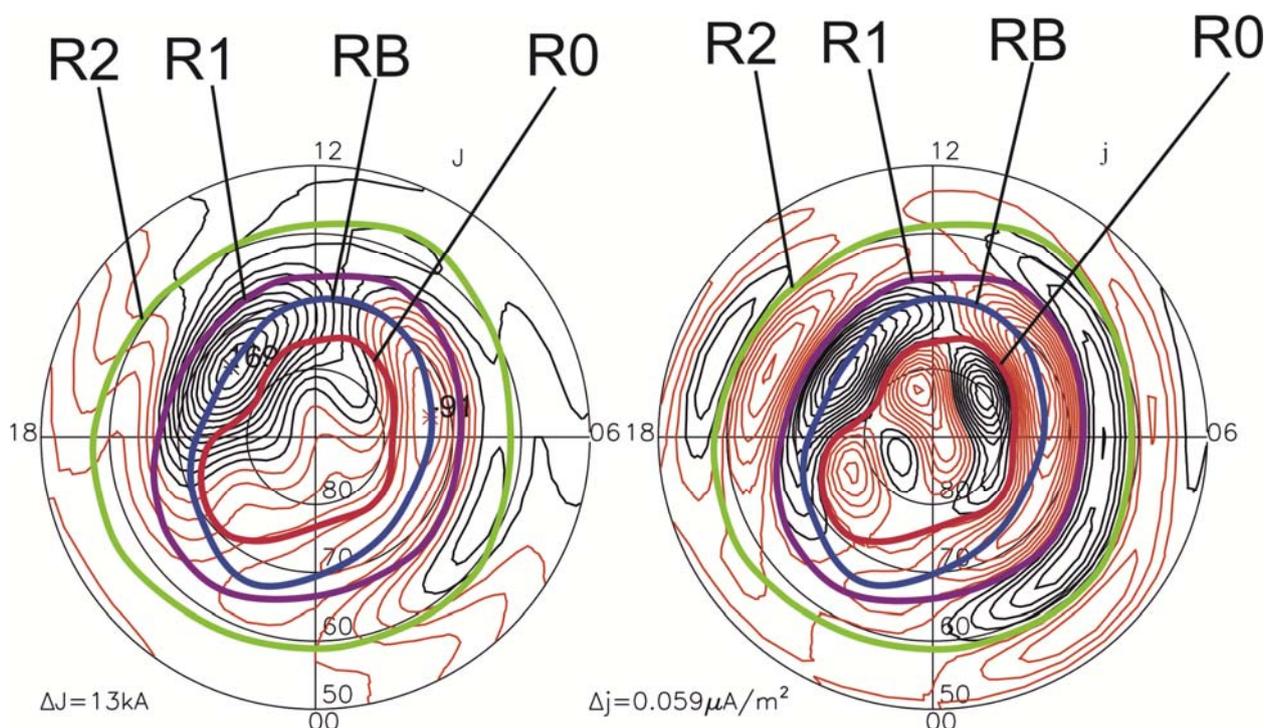


Рис. 3. Границы R0 (красная линия), RB (синяя), R1 (фиолетовая) и R2 (зеленая) на картах токовой функции (слева) и продольных токов (справа) для 03:50 UT 27.08.2001 г.

границы RB до нулевого значения плотности продольного тока зоны 1.

На полученные границы R0, R1 и R2 также накладываются уточняющие условия гладкости и устойчивости. На тех долготах, где не удается определить границы, применяется линейная интерполяция с последующим трехточечным сглаживанием.

#### Тестирование «человек–машина»

Описанный алгоритм был реализован в виде программы, которая по данным сферического гармонического анализа автоматически строит основные границы аврорального овала — R0, RB, R1 и R2. Для оценки качества работы алгоритма человек построил вручную эти границы для 133 моментов интервала (02:30–06:00) UT магнитосферной суббури 27 августа 2001 г. Та же задача была решена с помощью программы. Полученные результаты хорошо совпадают друг с другом визуально (рис. 4). Количественное сравнение двух способов приведено на графиках квантилей (рис. 5). Видно, что с достаточной точностью программный метод работает несколько не хуже человека.

С увеличением количества наземных магнитных обсерваторий, результаты нового сферического гармонического анализа будут отличаться от прежнего и поэтому оператору придется переделывать свою старую работу и тратить на это несколько дней.

Недостатком ручного метода проведения границ является не только время обработки, но и то,

что два человека могут провести границы по-разному. Более того, один и тот же человек в разное время может провести границы по-разному. Это связано со сложностью и неоднозначностью данной задачи. Автоматическое проведение границ лишено указанных недостатков. Время построения границ уменьшилось на 2–3 порядка при достаточной точности нового метода и границы всегда строятся однозначно для одних и тех же коэффициентов сферического гармонического анализа.

#### Заключение

В данной работе было получено:

1. Разработан оригинальный алгоритм построения границ аврорального овала.
2. Алгоритм реализован в виде программы автоматизированного нахождения границ.
3. Тест «человек—машина» показал достаточную точность алгоритма и программы.
4. Программа сокращает время обработки необходимых карт на 2–3 порядка, исключает человеческий фактор неоднозначности проведения границ и освобождает оператора от тяжелой рутинной работы.

Описанный алгоритм и построенная на его основании программа показала, что в большинстве случаев он хорошо справляется со своей задачей. Однако, на тех моментах, где ему не удалось построить границы, придется прибегнуть к ручной обработке.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-05-05561.

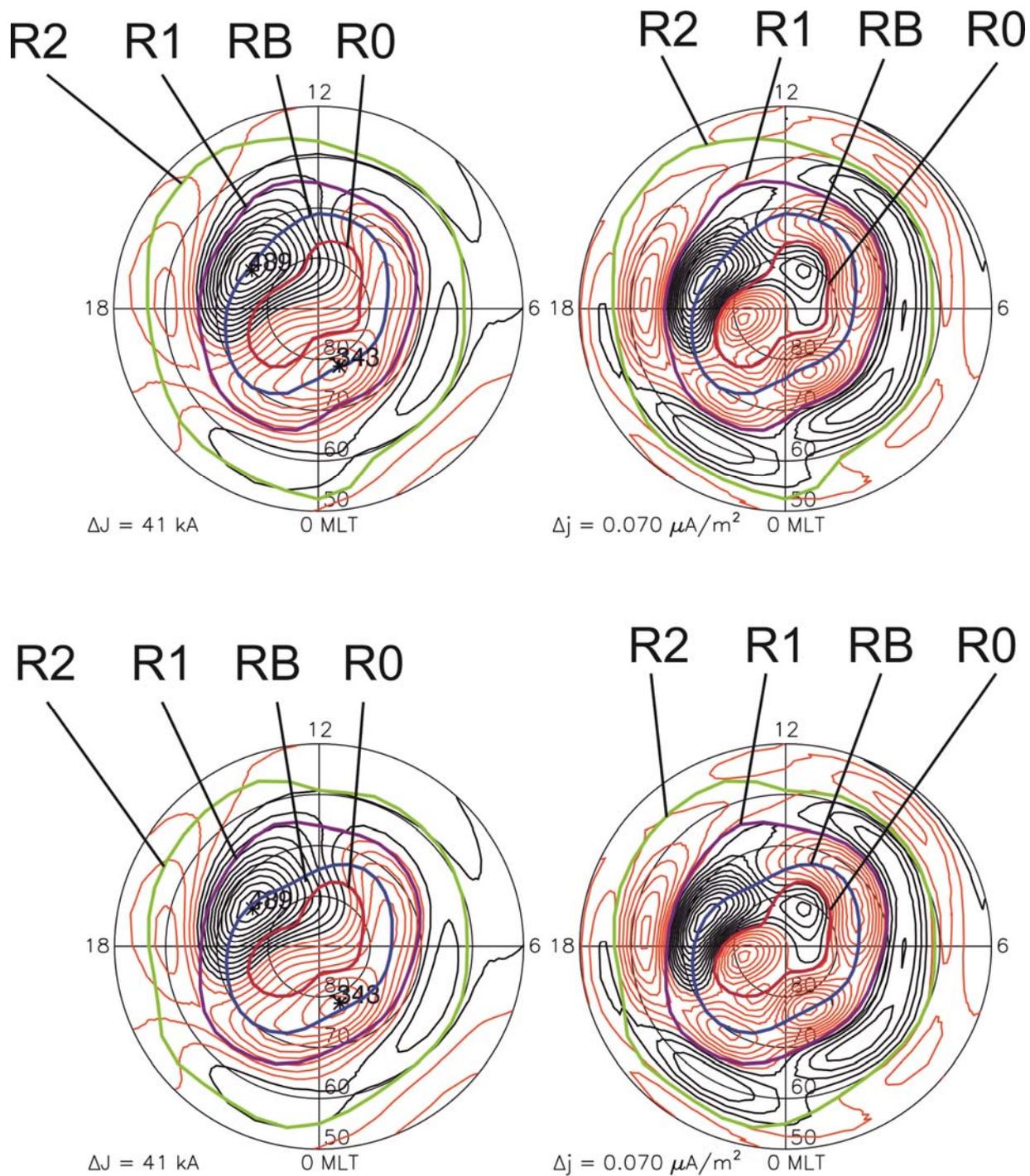


Рис. 4. Карты эквивалентной токовой функции (слева) и продольных токов (справа) с границами R0, RB, R1 и R2 построенными ручным (вверху) и программным (внизу) методами

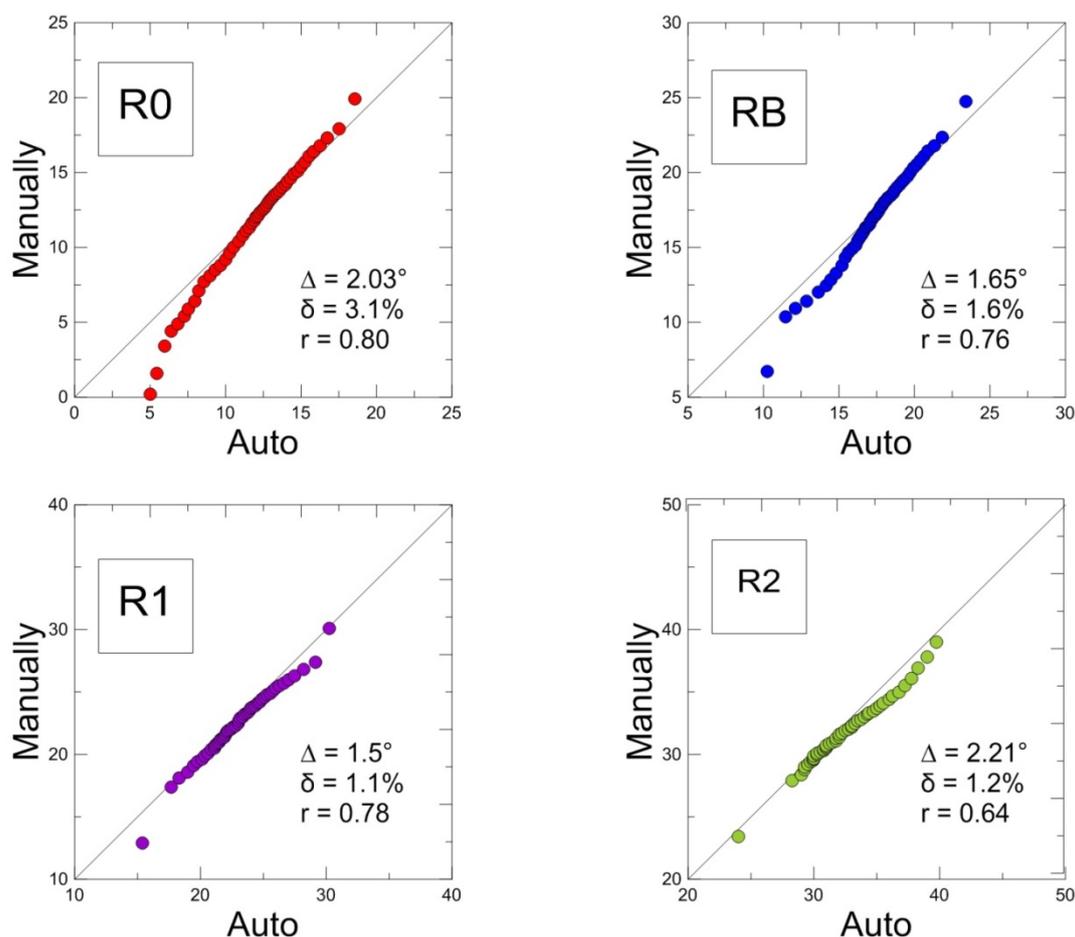


Рис. 5. График квантилей коширот для границ R0, RB, R1 и R2

### Список литературы

Фельдштейн Я.И. Открытие аврорального овала. Первые исследования и становление концепции // Солнечно-земная физика. 2015.

Akasofu S.I. Exploring the Secrets of the Aurora. Springer-Verlag. New York. 2007. 288 pp. DOI: 10.1007/0-387-45097-1.

Axford W.I., Hines C.O. A unifying theory of high-latitude // Geophysical Phenomena and Geomagnetic Storms, Can. J. Phys. 1961. V. 39(10). P. 1433–1464. DOI: 10.1139/p61-172.

Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6(2). P. 47–48. DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.47.

Fukushima N. Generalized theorem for no ground magnetic effect of vertical currents connected with Pedersen currents in the uniform-conductivity ionosphere // Report of Ionosphere and Space Research in Japan, 1976. V. 30(1-2). P. 35–40.

Kern J.W. Analysis of Polar Magnetic Storms // J. Geomag. Geoelectr. 1966. V. 18(2). P. 125–131.

Milan S.E., Hutchinson J., Boakes P.D., Hubert B. Influences on the radius of the auroral oval // Ann. Geophys. 2009. V. 27(7). P. 2913–2924. DOI: 10.5194/angeo-27-2913-2009.

Mishin V.M., Lunyushkin S.B., Shirapov D.S., Baumjohann W. A new method for generating instantaneous ionospheric conductivity models using ground-based magnetic data // Planet. Space Sci. 1986. V. 34(8). P. 713–722. DOI: 10.1016/0032-0633(86)90125-x.

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications // Space Sci. Rev. 1990. V. 53(1). P. 83–163. DOI: 10.1007/bf00217429.

Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., et al. Predictive ability of four auroral precipitation models as evaluated using Polar UVI global images // Space Weather. 2010. V. 8(12). P. S12004. DOI: 10.1029/2010sw000604.

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Auroral precipitation dynamics during strong magnetic storms // Geomagnetism and Aeronomy. 2007. V. 47(2). P. 185–192. DOI: 10.1134/s0016793207020065.