

АЛГОРИТМ ПОИСКА ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ВЫХОДНЫМ ДАННЫМ МОДЕЛИ OVATION PRIME

Ю.В. Пенских, В.Э. Капустин

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

ALGORITHM FOR FINDING THE AURORAL OVAL BOUNDARIES FROM OUTPUT DATA OF OVATION PRIME MODEL

Yu.V. Penskikh, V.E. Kapustin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
penskikh@iszf.irk.ru

Аннотация. Разработан алгоритм поиска полярной и экваториальной границ аврорального овала и линии максимума значений. Алгоритм применим для выходных данных модели OVATION Prime как для суммарных высыпаний, так и для отдельных типов. Алгоритм может быть легко адаптирован к другому типу авроральной активности (полярные сияния, проводимость, поток энергии высыпаящихся частиц и др.).

Ключевые слова: границы аврорального овала, OVATION Prime, авроральная активность, границы проводимости.

Abstract. The algorithm for finding the polar and equatorial boundaries of the auroral oval and the line of maximum values has been developed. It is applicable to the output data from OVATION Prime model, both for total precipitation and for individual types. The algorithm can be easily adapted to another type of auroral activity (auroras, conductivity, energy flux of precipitating particles, etc.).

Keywords: auroral oval boundaries, OVATION Prime, auroral activity, conductivity boundaries.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные методы исследования авроральной активности [Pitkänen, 2011], одним из которых является техника инверсии магнитограмм (ТИМ), которая по данным мировой сети наземных магнитометров позволяет рассчитывать электродинамические параметры ионосферы в двух полушариях Земли [Mishin, 1990; Мишин и др., 2021]. Несколько лет назад был разработан метод автоматической диагностики границ авроральных овалов (АО), который вошел в ТИМ в качестве одного из важных модулей [Лунюшкин, Пенских, 2019; Пенских и др., 2021]. В наши дальнейшие планы входит задача сопоставления границ авроральных овалов, полученных с помощью ТИМ, с границами АО, полученными другими существующими методами и наблюдениями.

Модель авроральных высыпаний OVATION Prime (OP) — одна из самых популярных моделей авроральной активности [Newell et al., 2010]. Благодаря открытому исходному коду OP-2010 стала прародителем ряда независимо развиваемых версий OP, на основе которых создавались интернет-сервисы, специализирующиеся в основном на изображениях АО, а не на его границах. Онлайн-сервис OP-2020 публикует карты с распределениями вероятности появления полярных сияний [<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>]. Сервис онлайн-диагностики границ АО по данным OP, по видимому, прекратил работу, поскольку изображения АО всегда показывают состояние на момент 28 января 2020 г. 14:48 UT, нет доступа и к архивным данным [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation_live/ovationdisplay.cgi?pole=N&type=E]. Для сравнения с данными ТИМ нам нужны численные значения границ АО, поэтому было решено создать алгоритм для определения АО по OP-2010.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

С помощью общедоступной программы OP-2010 были получены карты распределений потока энергии высыпаящихся частиц [<https://sourceforge.net/projects/ovation-prime>]. Модель позволяет проводить расчеты для высыпаний четырех типов: DIFF — diffuse aurora, MONO — monoenergetic aurora, IONS — ion aurora, WAVE — wave aurora [Newell et al., 2010].

Наряду с достоинствами OP-2010 не лишена недостатков, которые отмечает автор этой модели [Newell et al., 2014]. Основное ограничение OP-2010 связано с тем, что она не работает при сильных геомагнитных возмущениях ($K_p > 5$). Кроме того, результаты работы модели содержат шум типа соль/перец, который проявляется в виде экстремально низких/высоких точечных значений. Перечисленные недостатки автор OP устранил в новой версии модели OP-2013, исходный код которой не был опубликован.

Результаты OP-2010 интерполировались нами на однородную сетку с шагом 1° по широте, 10° по долготе. Шум соль/перец устранили с помощью медианного фильтра с окном 3×3 шага сетки. Суммарный тип высыпаний ALL рассчитывался как сумма высыпаний различных типов (DIFF, MONO, IONS, WAVE).

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПО ДАННЫМ OP

АО обычно не имеет четких границ, на которых наблюдалось бы резкое изменение физических параметров, поэтому критерии определения полярной и экваториальной границ АО не являются строгими. Границы АО часто определяются по некоторому заданному порогу значения функции, полученному эмпирическим путем, а потому даже для одних и тех

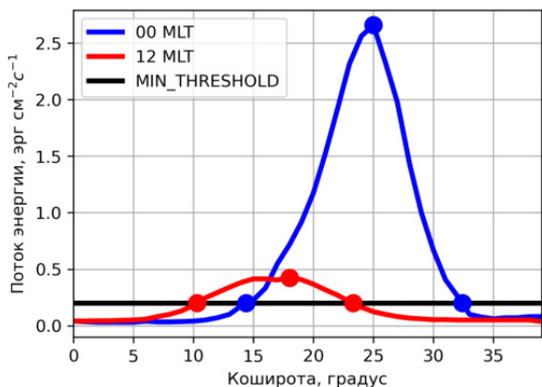


Рис. 1. Пример определения границ на меридиональных профилях выходных данных ОР. Синяя кривая — профиль ОР на меридиане 00 MLT; красная кривая — на меридиане 12 MLT; черная горизонтальная линия — пороговое значение функции, соответствующее границам АО. На каждом профиле точками обозначены положение полярной и экваториальной границ АО, а также максимальное значение функции

же измерений пороговые значения имеют большой разброс. В качестве такого порога в ОР исследователи используют различные значения в диапазоне 0.2–2 эрг см⁻² с⁻¹ [Machol et al., 2012; Kosar et al., 2018].

Опишем логику работы алгоритма для поиска границ АО. Каждый меридиональный профиль данных ОР имеет форму гауссоподобной функции, поэтому полярную и экваториальную границы можно найти в местах пересечения профиля функции с линией порогового значения (рис 1.).

В АО можно выделить еще одну важную границу — линию максимума значений. К сожалению, эту линию выделяют редко, ограничиваясь поиском полярной и экваториальной границ. Линия максимума значений имеет одно важное преимущество в сравнении с полярной и экваториальной границами — ее положение находится гораздо точнее, поскольку она не зависит от субъективно выбранного порогового значения. Линией максимума удобно пользоваться, особенно при сравнении с линиями максимума, полученными по данным других видов наблюдений.

Не некоторых меридианах, особенно на дневной стороне Земли, максимальное значение меридионального профиля может оказаться ниже порогового значения (MIN_THRESHOLD). Поскольку полярная и экваториальная границы овала не должны совпадать, требуется задать некоторое допустимое максимальное значение (MAX_THRESHOLD). Меридианы, на которых максимальное значение профиля ниже MAX_THRESHOLD, пропускаются. Вместо этого проводится интерполяция пропущенного диапазона между меридианами, на которых границы были определены. Выполнение алгоритма завершается трехточечной интерполяцией границ.

Для определения границ по данным модели ОР мы использовали MIN_THRESHOLD = 0.1 эрг см⁻² с⁻¹, MAX_THRESHOLD = 1.5 MIN_THRESHOLD. Алгоритм хорошо работает и при других значениях. Чем больше MIN_THRESHOLD, тем тоньше АО. Как было отмечено выше, пороговые значения во многом субъек-

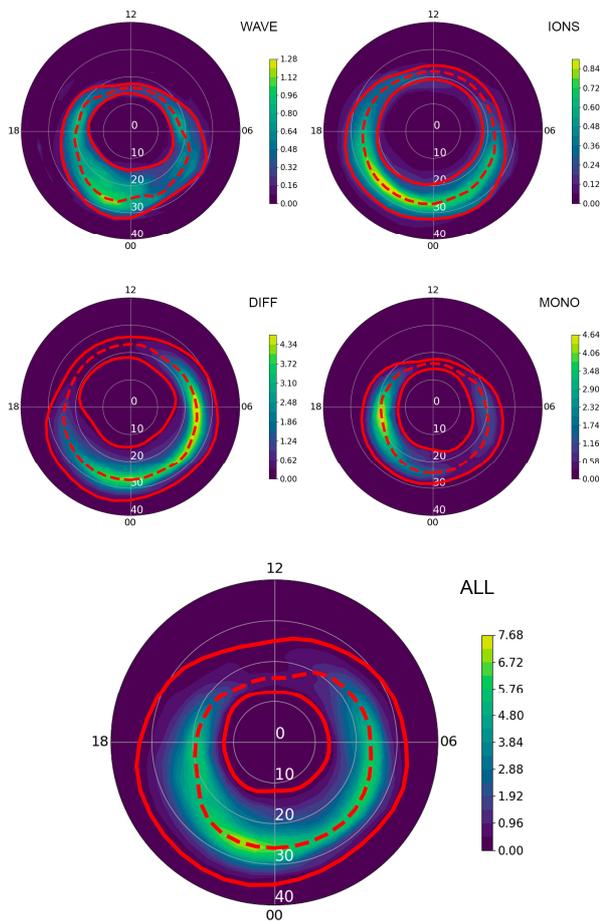


Рис. 2. Выходные данные ОР бури 17.08.2001 16:30 UT для высыпаний четырех типов (DIFF, MONO, IONS, WAVE), а также для суммарных значений (ALL). На каждой панели показаны границы, найденные автоматическим методом: полярные и экваториальные границы АО — сплошная линия, линия максимума значений — штриховая

тивны и при необходимости могут быть изменены. Используя этот довольно простой алгоритм, можно легко найти границы как для высыпаний отдельного типа, так и для суммарных высыпаний (рис. 2).

Алгоритм дополнительно испытывался на данных модели проводимости авроральной ионосферы [Spiro et al., 1982]. Для поиска границ повышенной проводимости Холла ионосферной плазмы использовалось пороговое значение MIN_THRESHOLD = 4 См, для MAX_THRESHOLD, как и раньше использовался коэффициент 1.5 (рис. 3). Вышеизложенный алгоритм поиска границ АО можно легко адаптировать к любому другому типу измерений, значения которого имеют гауссоподобное распределение (полярные сияния, проводимость, поток энергии высыпаящихся частиц и др.).

ВЫВОДЫ

В работе получены следующие результаты.

1. Частично устранены недостатки в результатах открытой модели ОР-2010 за счет сглаживания шума соль/перез и получения суммарного АО.
2. Разработан алгоритм автоматического определения границ АО по данным ОР-2010 как для суммарных высыпаний, так и для высыпаний отдельных типов: DIFF, MONO, IONS, WAVE.

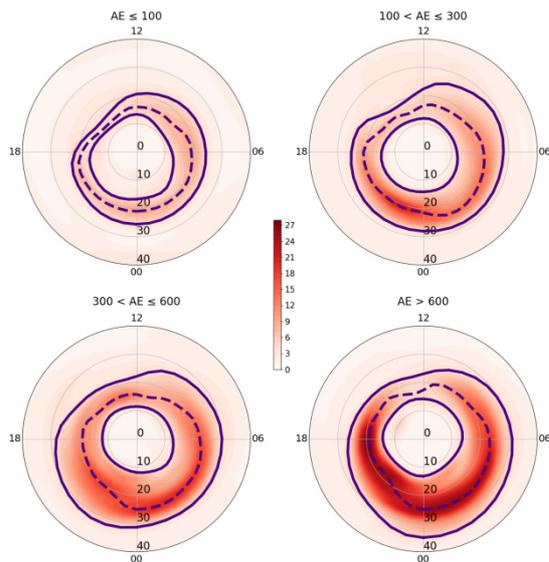


Рис. 3. Проводимость Холла ионосферной плазмы по модели Спиро для разных уровней геомагнитной активности (См). На каждую панель нанесены границы, найденные автоматическим методом. Полярные и экваториальные границы АО — сплошная линия, линия максимума значений — штриховая

3. Проведено дополнительное тестирование алгоритма на модели проводимости SPIRO.

4. Алгоритм может быть легко адаптирован к любому другому типу АО, меридиональные профили которого имеют гауссоподобное распределение (полярные сияния, проводимость, поток энергии высыпаящихся частиц и др.).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лунюшкин С.Б., Пенских Ю.В. Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 97–113. DOI: [10.12737/szf-52201913](https://doi.org/10.12737/szf-52201913).

Мишин В.В., Караваев Ю.А., Лунюшкин С.Б. и др. Динамика продольных токов в двух полушариях Земли в ходе магнитосферной бури по данным техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 1. С. 34–39. DOI: [10.12737/szf-71202104](https://doi.org/10.12737/szf-71202104).

Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 63–76. DOI: [10.12737/szf-72202106](https://doi.org/10.12737/szf-72202106).

Kosar B.C., MacDonald E.A., Case N.A., et al. A case study comparing citizen science aurora data with global auroral boundaries derived from satellite imagery and empirical models. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 177. P. 274–282. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.006).

Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., et al. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, no. 3. DOI: [10.1029/2011sw000746](https://doi.org/10.1029/2011sw000746).

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications. *Space Sci. Rev.* 1990. Vol. 53, no. 1-2. P. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).

Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. Vol. 115, no. A3. P. A03216. DOI: [10.1029/2009ja014805](https://doi.org/10.1029/2009ja014805).

Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather*. 2014. Vol. 12, no. 6. P. 368–379. DOI: [10.1002/2014sw001056](https://doi.org/10.1002/2014sw001056).

Pitkänen T. *Dynamics of the polar cap boundary and the auroral oval in the nightside ionosphere*. Oulu, Finland, Department of Physics University of Oulu. 2011. 69 p.

Spiro R.W., Reiff P.H., Maher L.J. Precipitating electron energy flux and auroral zone conductances-An empirical model. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1982. Vol. 87, no. A10. P. 8215–8227. DOI: [10.1029/JA087iA10p08215](https://doi.org/10.1029/JA087iA10p08215).

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast> (дата обращения 1 июня 2022 г.).

URL: http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation_live/ovationdisplay.cgi?pole=N&type=E (дата обращения 1 июня 2022 г.).

URL: <https://sourceforge.net/projects/ovation-prime> (дата обращения 1 июня 2022 г.).