

УДК 523.9

Научная статья

## **О точности определяемых видимых границ полярных сияний в модели OVATION Prime (PC)**

*А. В. Николаев, С. А. Долгачёва, С. А. Черняева*

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397,  
г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

E-mail: demosfen.spb@gmail.com

Оценка положения экваториальных границ аврорального овала при разных магнитосферных условиях, несёт в себе информацию о формирующихся плазменных структурах, глубине их проникновения во внутреннюю магнитосферу, движении внутренней границы плазменного слоя и т.д. Развитие алгоритмов определения положения видимой экваториальной границы аврорального овала является важной частью исследований, связанных с разработкой моделей химического состава ионосферы, моделей авроральных высыпаний частиц и оценки точности этих моделей. Немаловажную роль исследования полярных сияний (прогноз, интенсивность, положение) играют и для развития туристического сегмента в Арктике и информационных ресурсов служб мониторинга и прогноза космической погоды. В рамках исследования оценки точности положения видимых границ овала сияний в моделях авроральных высыпаний частиц была выбрана наземная наблюдательная сеть оптических камер всего неба проекта THEMIS, запущенная в 2008 г., и модифицированная модель OVATION Prime (PC), разработанная в отделе Геофизики ФГБУ "АНИИ" использующая в качестве входного параметра наземный индекс полярной шапки (PC-индекс).

*Ключевые слова: авроральные высыпания частиц, модель высыпаний частиц, границы овала, высокоширотная ионосфера, оценка точности, камеры всего неба*

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-171-182

Поступила в редакцию: 23.10.2021

В окончательном варианте: 26.11.2021

**Для цитирования.** Николаев А. В., Долгачёва С. А., Черняева С. А. О точности определяемых видимых границ полярных сияний в модели OVATION Prime (PC) // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2021. Т. 37. № 4. С. 171-182. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-171-182

*Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)*

© Николаев А. В., Долгачёва С. А., Черняева С. А., 2021

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета по теме 6.1 «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики».

## Введение

Исследования, выполненные наземными и спутниковыми средствами наблюдения, выявили наличие характерных зон вторжения заряженных частиц космического происхождения в высокоширотную атмосферу Земли. Наличие этих областей с различными параметрами вторгающихся частиц определяется структурой магнитосферы и ее динамикой под воздействием внешних факторов. При взаимодействии солнечного ветра и вмороженного в него межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитосферой Земли генерируются электрические поля и токи, вызывающие геомагнитные возмущения, одним из проявлений которых являются магнитосферные суббури, феноменологическое описание которых основывается на магнитосферных и авроральных наблюдениях.

Полный цикл магнитосферной суббури включает в себя: (1) накопление поступающей солнечной энергии в хвосте магнитосферы (предварительная фаза), в ходе которой происходит поджатие дневной магнитопаузы и вытягивание силовых линий хвоста; (2) внезапное высвобождение магнитной и кинетической энергии плазмы (взрывная/основная фаза); (3) возвращение конфигурации силовых линий магнитосферы и состояния плазменного слоя к спокойному уровню (фаза восстановления). Следствием активных структурных изменений в возмущённой магнитосфере является формирование и расширение авроральной зоны в сторону экватора, при этом интенсивность авроральных высыпаний частиц значительно увеличивается, становясь основным источником ионизации в полярной ионосфере. Усиливающийся поток энергии электронов и ионов сопровождается свечениями (полярными сияниями), по форме, структуре, размеру и интенсивности которых можно судить о процессах, протекающих в плазменном слое и удаленных частях магнитосферы, а также изменении конфигурации силовых линий магнитосферы.

Область частых появлений полярных сияний в Южном и Северном полушариях представляют собой овалы (авроральные овалы), расположенные на высотах E- и F-слоя ионосферы в высоких широтах Земли и смещенные на ночную сторону относительно геомагнитных полюсов. В дневном секторе авроральной зоны визуально наблюдаемые сияния достаточно хорошо совпадают с положением границы области замкнутых и разомкнутых магнитных силовых линий (полярного каспа), куда возможно прямое проникновение частиц солнечного ветра. В ночной части аврорального овала полярные сияния формируются за счет вторжения энергичных частиц плазменного слоя, расположенного в хвосте магнитосферы. Оценка положения экваториальных границ аврорального овала при разных магнитосферных условиях, несёт в себе информацию о формирующихся плазменных структурах, глубине их проникновения во внутреннюю магнитосферу, движению внутренней границы плазменного слоя и т.д. Развитие методов и алгоритмов определения положения видимой экваториальной границы аврорального овала является важной частью исследований, связанных с разработкой моделей химического состава ионосферы, моделей авроральных высыпаний частиц и оценки точности этих моделей. Немаловажную роль исследования полярных сияний (прогноз, интенсивность, положение) играют и для развития туристического сегмента в Арктике и информационных ресурсов служб мониторинга и прогноза космической погоды.

Для оценки положения видимых границ овала сияний была выбрана наземная наблюдательная сеть оптических камер всего неба проекта THEMIS (Time His-

tory of Events and Macroscale Interactions during Substorms), запущенная в 2008 г. (подробное описание дано в работе [1]) и функционирующая в настоящее время. Проект THEMIS включает в себя 22 камеры, расположенные в Канадском секторе и распределенные по долготе от Канады до Аляски. Пространственное разрешение снимков камер  $\sim 1$  километр, временное разрешение  $\sim 3$  секунды. Модельные оценки положений аврорального овала рассчитываются с помощью модифицированной модели OVATION Prime (PC) (в дальнейшем OV-PC), разработанной в отделе Геофизики ФГБУ «ААНИИ» (см. работы [2, 3]). В отличие от оригинальной модели OVATION Prime (2010) (в дальнейшем OV-2010, исходный код доступен по адресу <https://sourceforge.net/projects/ovation-prime/>), описанной в работе [4] в OV-PC в качестве входного параметра используется наземный индекс полярной шапки (PC-индекс) [5], который повышает точность оценки характеристик аврорального овала в OV-2010, однако в настоящее время исключает возможность их прогноза больше чем на 15 минут (подробнее в работе [2]).

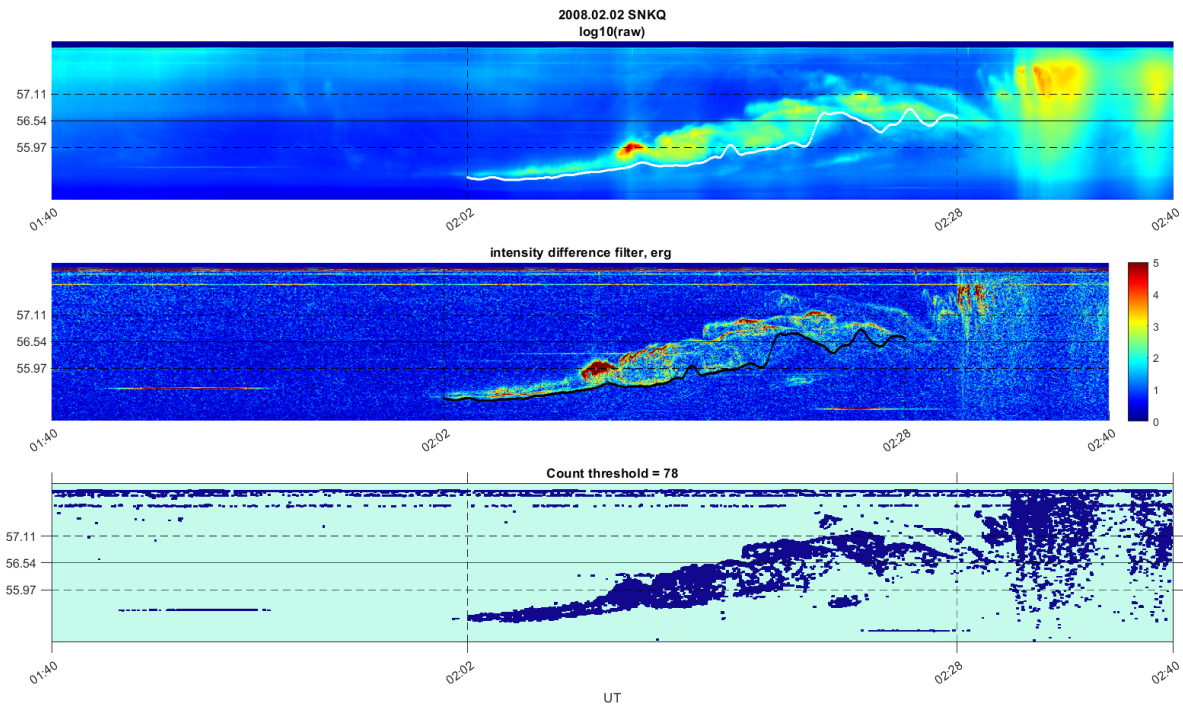
Помимо наземной сети камер для решения подобной задачи потенциально могут быть привлечены наблюдения спутника Polar (1996 – 2008 гг.) [6]. Однако для анализа оригинальных спутниковых снимков требуется информация о (1) калибровках приборов спутника, (2) уровне дневной засветки спутниковых снимков, которая неразличима со свечением аврорального овала, (3) корректировке углов обзора спутниковых камер, (4) информация о коэффициентах матриц поворота, для перехода из родных систем координат спутников в исправленные геомагнитные координаты. В настоящий момент результатов обработки спутниковых снимков с привязкой к геомагнитным координатам в открытом доступе нет, при этом обработка оригинальных спутниковых снимков требует вышперечисленных данных и разработанной методики (алгоритма). Поэтому в рамках данного исследования возможность оценки границ видимых сияний по спутниковым наблюдениям не осуществлялась.

## **Отбор оптических данных проекта THEMIS и их обработка**

Чтобы определить положение границ видимых высыпаний частиц по наземным данным в исследовании использовались кеограммы, полученные по снимкам станций сети THEMIS [7]. В течение зимнего периода временное покрытие наземных наблюдений доступно с 00:00 ч. по 15:00 ч. мирового времени (UT), покрывающее сектор примерно от 17 до 07 ч. местного магнитного времени (MLT). Широтный диапазон обзора камер всего неба составляет  $\sim 9^\circ$ , при этом цепочка наблюдений покрывает примерно 90% магнитосферных суббурь, возникающих в Северной Америке. Выбор наземных средств наблюдений для оценки положения видимых экваториальных границ обусловлен (1) доступностью данных снимков камер всего неба (<http://themis.igpp.ucla.edu>), (2) широким временным промежутком (с 2008 г. по 2021 г.), а также (3) возможностью провести процедуру полуавтоматической обработки снимков с помощью разностных фильтров.

Всего было в ручном режиме просмотрено 3 года снимков камер за период 2008-2010 год. В каждом отдельно взятом событии (суббуре) из всей цепочки сети THEMIS выбиралось от 1 до 4 станций, на кеограммах которых невооруженным глазом видна динамика развития полярных сияний (диффузных и дискретных структур). Для анализа были выбраны кеограммы для трёх уровней геомагнитной

возмущенности, которые отбирались по средней величине РС-индекса:  $PC0 < 2.5$  mV/m (слабовозмущенный уровень),  $2.5 < PC1 < 4$  mV/m (средневозмущенный уровень) и  $4 < PC2 < 8$  mV/m (сильновозмущенный уровень). Область анализа кеограммы ограничивалась углом  $60^\circ$  относительно зенита камеры, который находится на уровне 128 пикселя (px) кеограммы (полная ширина составляет 255 px).



**Рис. 1.** Кеограмма станции SNKQ (56.54 с.ш. - зенит станции) для события 2008/02/02, началом суббури в 02:02 UT. Сплошной линией отмечен зенит станции, пунктирными - моменты начала суббури и анализируемый алгоритмом участок неба; белой линией отмечена полученная граница овала; (в центре) обработанная разностным фильтром кеограмма станции; (снизу) результат бинаризации обработанной кеограммы

На рис. 1 приведен пример кеограммы станции SNKQ для события 2008/02/02, на которой отчетливо видно развитие диффузной границы сияний и активной области высыпаний в ходе развития суббури; отмечено положение зенита станции (сплошная линия, совпадает с географической широтой станции) и область анализа кеограммы, отмеченная пунктирной линией. Выбор  $60^\circ$  угла обзора камеры с центром в зените обусловлен тем, что при приближении к горизонту оптические искажения системы линз камеры дают нелинейную зависимость между номером пикселя и географической широтой, которой этот пиксел соответствует [7].

Пересчет номера пикселя в географическую широту производился из простых геометрических преобразований, проиллюстрированных на рис. 2.

$$\alpha = -90 + px \cdot 0.703$$

$$\beta = \alpha - \arcsin \frac{R_0 \cdot \sin \alpha}{R_0 + r}$$

$$x = y + \beta$$

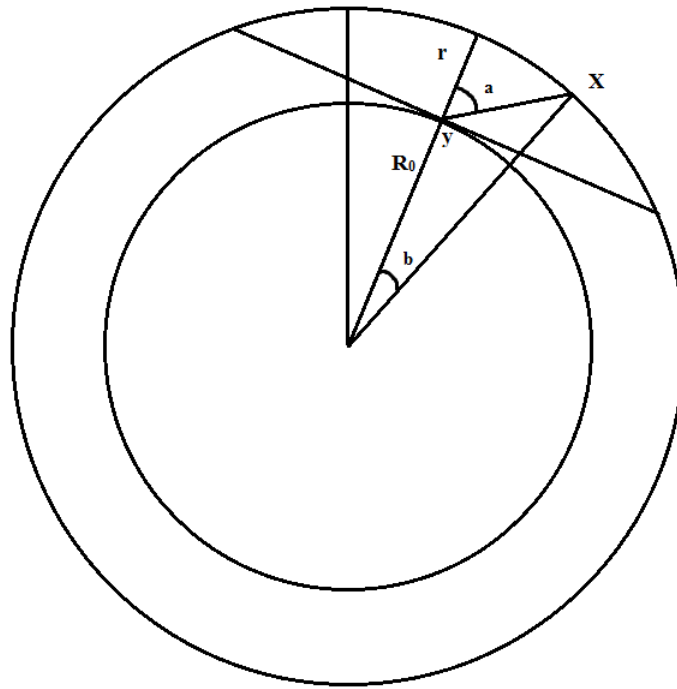


Рис. 2. Схематическое изображение Земли и окружающей оболочки атмосферы (ионосферы). Касательная в точке  $y$  – полный угол обзора камеры на поверхности Земли, соответствующий  $180^\circ$

В приведенных формулах  $y$  – широта станции,  $X$  – искомая широта,  $r = 110$  km (расстояние от поверхности Земли до уровня E-слоя ионосферы),  $R_0 = 6371.2$  km (радиус Земли). С ростом угла обзора камеры (относительно зенита) происходит нарастание нелинейности пересчета номера пикселя ( $px$ ) в широту, которое связано с кривизной поверхности Земли.

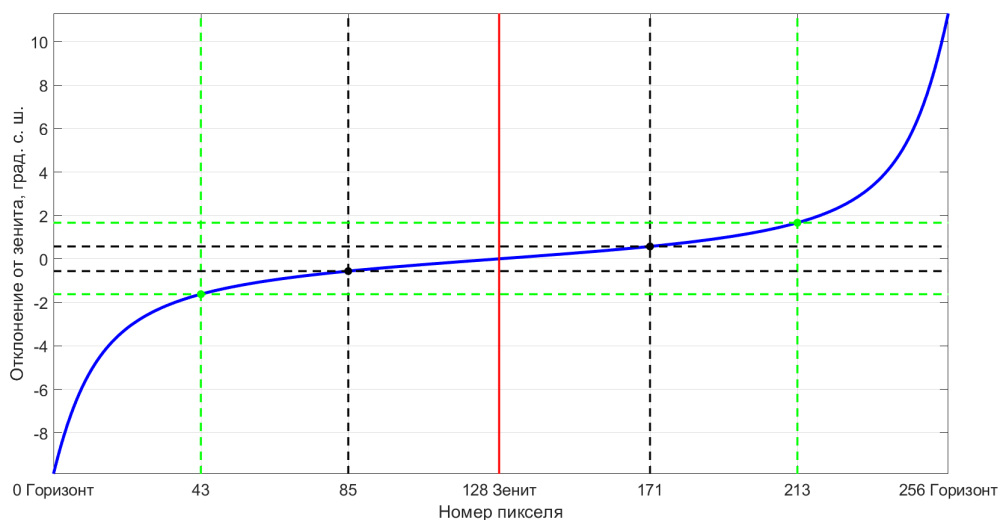


Рис. 3. Соответствие изменения величины широты от зенита станции в зависимости от номера пикселя камеры всего неба

На рис. 3 приведен расчет нарастания нелинейности, на котором красной линией (в центре) отмечен зенит станции, зелёными линиями отмечен угол обзора камеры размером  $170 \text{ px}$  ( $120^\circ$ ), в пределах которого широта, соответствующая наблюдаемому участку неба, меняется линейно. Если наблюдаемая структура на кеограмме выходит за пределы линейного промежутка, кеограммы в статистический анализ не включаются.

Обработка каждой кеограммы осуществлялась с помощью разностного фильтра. Разностные фильтры – это линейные фильтры, задаваемые дискретными аппроксимациями дифференциальных операторов (по методу конечных разностей) [8]. Данный тип фильтров играет важную роль для задач поиска границ на изображении. Простейшим дифференциальным оператором является взятие производной по  $x$ -координате (в нашем случае, это строки цифровых матриц кеограмм), который определен для непрерывных функций.

Из цифровых данных создавалась матрица элементами которой были величины интенсивности пикселей матрицы камер (далее counts). Первым шагом является обработка столбцов: из каждого последующего столбца исходной матрицы вычитался предыдущий (матрица  $A$  с элементами  $a_{i,k}$ ). Второй шаг – обработка строк аналогичным образом (матрица  $B$  с элементами  $b_{i,k}$ ). Затем вычислялась матрица  $C$ , с элементами  $c_{i,k} = \sqrt{(a_{i,k}^2 + b_{i,k}^2)}$ . На среднем рис. 1 приведен пример визуализации матрицы  $C$ , представляющую собой результат обработки кеограммы разностным фильтром. В отличие от оригинальной кеограммы (см. верхний рис. 1) контрастность заметно повысилась, экваториальная часть границы стала отчетливее. По смыслу, вычитание интенсивностей соседних пикселей и последующее их усреднение позволяет в некоторой степени вычистить фоновую засветку неба около границы и выделить структурные усиления яркости в ходе развития суббури. Однако стоит отметить, что применение разностного фильтра не исключает наличие шумовых засветок кеограммы.

Положение видимой границы сияний на обработанных кеограммах определяются с помощью результатов калибровки каждой камеры сети THEMIS, приведенные в работе [9] (см. таблицу), в которой указано соответствие потока энергии (и поверхностной светимости неба в кило-Релеях [10]) отклику каждой камеры цепочки THEMIS на длине волн  $557.7 \text{ nm}$ . Пороговым значением потока энергии экваториальной границы овала выбрано теоретически рассчитанное значение равное  $1 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$  [11], которое приблизительно соответствует порогу видимости сияний адаптированным к темноте человеческим глазом в условиях полной темноты. В рамках нашего исследования рассматривался промежуток пороговых значений  $1 - 2_{keo} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$  с шагом 0.25 так как в реальных условиях оптические камеры регистрируют естественную засветку неба и границы структур сияний могут быть неразличимы на кеограммах при низких порогах. (Здесь и далее, нижние индексы "keo" и "ov-rc" обозначают пороговую величину потока энергии электронов, взятую на кеограммах и в модели OV-PC соответственно).

За процедурой линейной фильтрации кеограмм следует процедура их бинаризации, которая заключается в отсечке всех пикселей, интенсивность которых ниже порогового значения (по величине counts), указанного в таблице. Пример отсечки границы по пороговому значению приведен на нижнем рис. 1: нижняя граница выделенной структуры (тёмно-синий цвет) - предполагаемая видимая граница аврорального овала.

Таблица

**Калибровки камер цепочки THEMIS  
(из материалов [9])**

№ Камеры	counts/кРэлей	counts/эрг
02	90	54
03	94	57
04	122	73
05	128	77
06	130	78
07	130	78
08	140	84
09	130	78
10	134	81
11	130	78
12	134	80
13	127	77
14	118	71
15	129	78
16	136	82
17	109	65
18	136	82
19	132	80
20	127	77
21	127	76
22	130	78

### Оценка положения границы овала сияний в модели OVATION Prime (PC)

Аналогичным образом определялись границы по потокам энергии в расчетах модели OV-PC. В отличие от реально наблюдаемых сияний, алгоритм получения границы видимого овала в модели заметно проще так как модель рассчитывает поток энергии в единицах  $\frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  на регулярной сетке с ячейкой размером  $0.25 \text{ h} \times 0.25^\circ$  (в единицах часа местного магнитного времени (MLT)  $\times$  испр. геомагн. широту (CGLat)).

На рис. 4. показан пример расчета потока энергии энергичных электронов (слева) и выделение границы видимого овала в результате бинаризации (красная линия на рисунке справа) по порогу  $1_{ov-pc} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ . При вычислении модельной экваториальной границы сияний было учтено, что пространственно-временное разрешение модели OV-PC ниже широтного разрешения снимка камеры (например, временное разрешение модели составляет 1 минута, при этом разрешение кеограммы - 3 секунды). Для проведения статистического сравнения расчетных и наблюдаемых границ, разрешение снимков камеры по широте, долготе и по времени было сведено к разрешению модели.

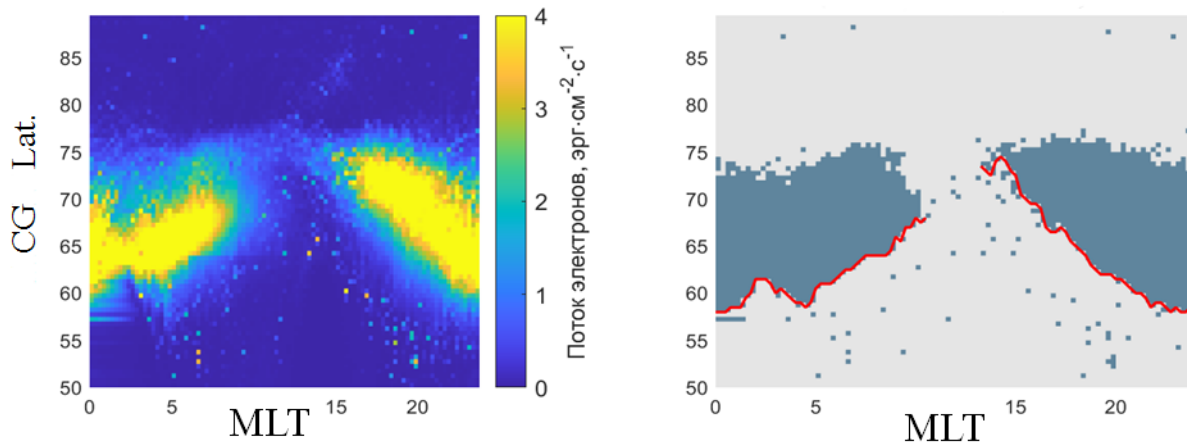


Рис. 4. Пример расчета потоков энергичных электронов в модели OV-PC (слева) и определения видимой границы овала в процедуре бинаризации (красная линия на рисунке слева). По горизонтальной оси отложено время в часах местного магнитного времени (MLT), по вертикальной исправленная геомагнитная широта (CGLat).

## Результаты

В общей сложности в полуавтоматическом режиме нами было обработано 158 кеограмм, по которым были определены: 1506 границ для порога  $1_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ , 1308 –  $1.25_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ , 1090 –  $1.5_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ , 906 –  $1.75_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  и 1389 для порога  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ . Экваториальной границей считалась линия, длина которой не менее 3 минут, и которая не выходит за пределы области анализа кеограммы ( $\pm 60^\circ$  относительно центра/зенита кеограммы). Также все определенные наблюдаемые и модельные границы для каждой станции для каждого уровня магнитной возмущенности ограничивались по долготе. Для слабых возмущений (уровень PC0) исключались промежутки от 06 до 21 h MLT, для среднего (PC1) от 07 до 19 h MLT, для сильного (PC2) от 8 до 18 h MLT. Эти ограничения были введены с целью минимизации ошибки определения границ на краю овала в условиях дневной засветки. С теми же ограничениями для тех же пороговых значений потоков энергии вычислялись экваториальные границы с помощью модели OV-PC. Сравнение наблюдаемых и расчетных границ овала производилось поточечно путем вычисления средней дельты их широты  $\Delta lat = GLat_{obs} - GLat_{mod}$  для каждого из трёх уровней возмущенности.

Рис. 5 показывает величины  $\Delta lat$ , полученные при сравнении всех распознанных на кеограммах границ овала по разным пороговым значениям потока энергии со всеми вычисленными моделью OV-PC. По величине  $\Delta lat$  и ее среднеквадратическому отклонению определялся наиболее точный критерий выбора видимой границы и точность её определения в модифицированной модели OV-PC.

По осям  $Ox$  рис. 5 отложены пороговые значения потока энергии для модельных границ, при этом каждый отдельный график (5а, 5б, 5с, 5д, 5е) соответствует конкретному потоку энергии, по которому определялись границы на кеограммах:  $1_{keo}$  (5а),  $1.25_{keo}$  (5б),  $1.5_{keo}$  (5с),  $1.75_{keo}$  (5д) и  $2_{keo}$  (5е)  $\frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  соответственно. Из представленных результатов видно, что для всех трёх уровней возмущенности наиболее точно соответствуют друг другу модельные границы, выбранные по критерию  $2_{ov-pc} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ , и наблюдаемые на кеограммах по критерию  $1.75 - 2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$ .

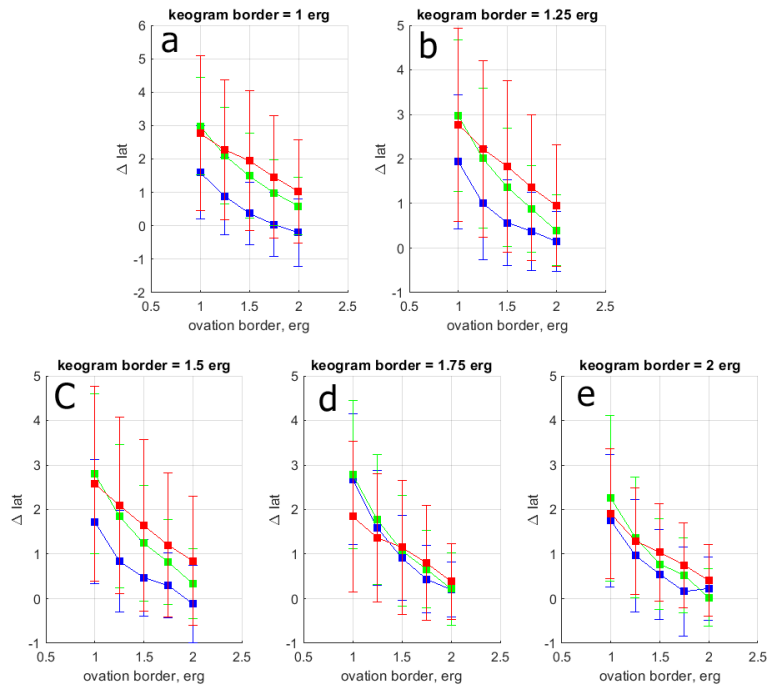


Рис. 5. Величины  $\Delta lat$ , полученные при сравнении всех распознанных на кеограммах границ овала по разным пороговым значениям потока энергии со всеми вычисленными моделью OV-PC. Уровни геомагнитной активности отмечены цветными линиями: PC0 (низкий), PC1 (средний), PC2 (высокий). Графики a, b, c, d, e соответствуют конкретному потоку энергии, по которому определялись границы на кеограммах:  $1_{keo}$  (a),  $1.25_{keo}$  (b),  $1.5_{keo}$  (c),  $1.75_{keo}$  (d) и  $2_{keo}$  (e)  $\frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$

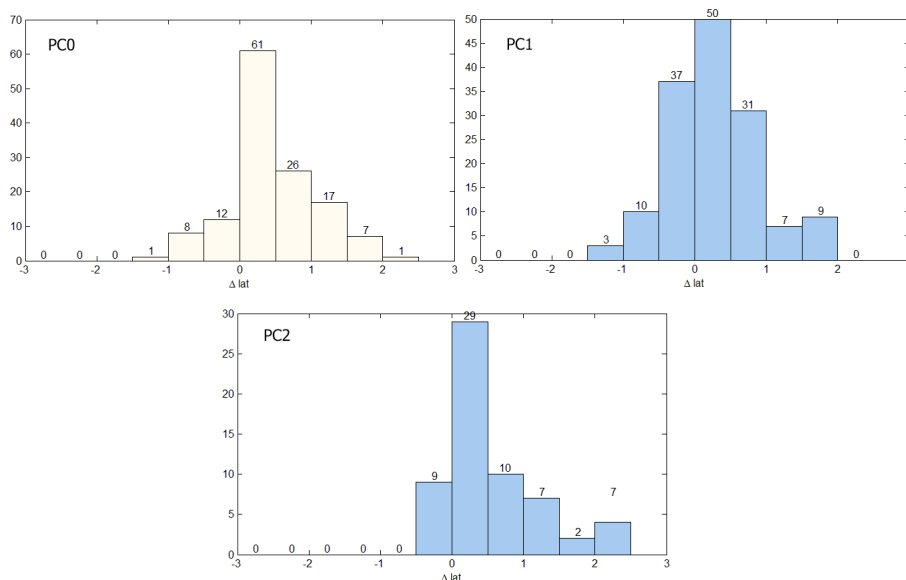


Рис. 6. Распределение величин  $\Delta lat$  при разных уровнях активности для выбранных пороговых значений:  $1.5_{ov-pc}$  и  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  (PC0),  $2_{ov-pc}$  и  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  (PC1) и  $1.75_{ov-pc}$  и  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  (PC2)

На рис. 6 представлены распределения величин  $\Delta lat$ , полученных из сравнений  $1.5_{ov-pc}$  и  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  (PC0),  $2_{ov-pc}$  и  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  (PC1) и  $1.75_{ov-pc}$  и  $2_{keo} \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  (PC2) соответственно.

## Заключение

Наземная наблюдательная сеть оптических камер всего неба проекта THEMIS в рамках текущей работы позволила произвести оценку точности определения экваториальных границ видимых сияний в модифицированной модели OVATION Prime (PC). Полученные результаты статистического анализа показали, что поток энергии электронов равный  $2 \frac{erg}{cm^2 \cdot sec}$  является наиболее оптимальным критерием (пороговым значением) для оценки положения видимой границы сияний в моделях высокоширотных высыпаний частиц. Полученный результат соответствует ранее сделанному предположению о видимых границах в работе [11]. Для выбранного порогового значения потока энергии отклонение модельной широты границ сияний от наблюдаемой камерами THEMIS в среднем не превышает  $\pm 1^\circ$  примерно в 73% случаев для низкого уровня геомагнитных возмущений, 87% для среднего уровня и 75% для высокого уровня геомагнитных возмущений. На основании полученных результатов можно заключить, что точность определения границ видимых сияний в модели OVATION Prime (PC) в ночной части овала по оптимальным критериям сравнения составляет примерно  $0.5^\circ$  CGLat со среднеквадратичным отклонением  $\pm 1^\circ$  CGLat. Также стоит отметить, что угол обзора камер всего неба от горизонта до горизонта в пересчете на широту составляет примерно  $8^\circ$ . Это означает, что если при определении с помощью модельных вычислений положения видимых сияний ошибка модели возрастет до  $4^\circ$ , наблюдатель так или иначе увидит сияния ближе к горизонту в благоприятных метеоусловиях. Это говорит о широких возможностях применения модифицированной модели OVATION Prime (PC) для целей текущего мониторинга состояния ионосферы.

## Благодарность

Авторы благодарят проект THEMIS (<http://themis.igpp.ucla.edu>) за предоставленные в открытом доступе данные снимков Канадской цепочки камер всего неба, а также Патрика Ньюэлла и соавторов за доступные в открытом доступе исходные коды модели авроральных высыпаний частиц OVATION Prime (2010) (<https://sourceforge.net/projects/ovation-prime/>).

**Конкурирующие интересы.** Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

## Список литературы/References

1. Angelopoulos V. The THEMIS Mission // *Space Sci Rev*, 2008. vol. 141, 5.
2. Nikolaev A. V. On the Need to Reparametrize the OVATION Prime (2010) Auroral Precipitation Model // *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021. vol. 46, pp. 194–199.

3. Ovodenko, V. B. et al. Spatial and temporal evolution of different-scale ionospheric irregularities in Central and East Siberia during the 27–28 May 2017 geomagnetic storm // *Space Weather*, 2020. vol. 18, e2019SW002378.
4. Newell, P. T., T. Sotirelis, and S. Wing. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora // *J. Geophys. Res.*, 2010. vol. 115, A03216.
5. Troshichev O. A. *Polar cap magnetic activity (PC index) and space weather monitoring*: Editions Universitaires Europeennes, 2017. 140 pp. ISBN 978-3-8381-8012-0.
6. Brittnacher, et al. Auroral observations by the Polar Ultraviolet Imager UVI // *Advances in Space Research*, 1997. vol. 20, pp. 1037–1042.
7. Mende, S. B., et al. The THEMIS Array of Ground-based Observatories for the Study of Auroral Substorms // *Space Sci Rev*, 2008. vol. 141, 357.
8. Гуров А. А., Порфирьева Н. Н. Обработка изображений на ЭВМ методами линейной фильтрации // *Труды ГОИ им. С. И. Вавилова*, 1982. Т. 185, С. 33–50. [Gurov A. A., Porfir'eva N. N. Obrabotka izobrazheniy na EVM metodami lineynoy fil'tratsii // *Trudy GOI im. S. I. Vavilova*, 1982. vol. 185, pp. 33–50 (In Russian)].
9. Mende, S. B., et al. Substorm triggering by poleward boundary intensification and related equatorward propagation // *J. Geophys. Res.*, 2011. vol. 116, A00I31.
10. Hunten, D. M.; Roach, F. E.; Chamberlain, J. W. A photometric unit for the airglow and aurora // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1956. vol. 18, pp. 345–346.
11. Machol, J. L., et al. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae // *Space Weather*, 2012. vol. 10, S03005.

## **On the accuracy of aurora visible boundaries in the OVATION Prime (PC) model**

*A. V. Nikolaev, S. A. Dolgachyova, S. A. Chernyaeva*

Arctic and antarctic research institute, 199397, Saint-Petersburg,  
Beringa st., 38, Russia

E-mail: [demosfen.spb@gmail.com](mailto:demosfen.spb@gmail.com)

The location of the equatorial boundaries of the auroral oval under different magnetospheric conditions contains information about the forming plasma structures, the depth of their penetration into the inner magnetosphere, the motion of the inner boundary of the plasma layer, etc. The development of methods and algorithms for determining the position of the visible equatorial boundary of the auroral oval is an important part of research related to the development of models of the chemical composition of the ionosphere, models of auroral particle precipitation, and assessment of the accuracy of these models. Research of aurora borealis (forecast, intensity, position) also plays an important role for the development of the tourist segment in the Arctic and information resources of space weather monitoring and forecasting services.

*Keywords: auroral precipitations, auroral precipitation model, auroral oval boundaries, free product, highlatitude ionosphere, all-sky cameras.*

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-171-182

Original article submitted: 23.10.2021

Revision submitted: 26.11.2021

**For citation.** Nikolaev A. V., Dolgachyova S. A., Chernyaeva S. A. On the accuracy of aurora visible boundaries in the OVATION Prime (PC) model. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **37**: 4, 171-182. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-171-182

**Competing interests.** The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

**Contribution and Responsibility.** All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)*

© Nikolaev A. V., Dolgachyova S. A., Chernyaeva S. A., 2021

**Funding.** The work was carried out as part of the research work of Roshydromet on topic 6.1 "Development and modernization of technologies for monitoring the geophysical situation over the territory of the Russian Federation and the Arctic".