

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Пенских Юрия Владимировича**

### ДИАГНОСТИКА АВРОРАЛЬНЫХ ОВАЛОВ В ДВУХ ПОЛУШАРИЯХ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 25.00.29 – «физика атмосферы и гидросферы»

Магнитное поле Земли подвергается непрерывному воздействию солнечного ветра – потоков плазмы, излучаемой Солнцем в космическое пространство. В экстремальных случаях в земной магнитосфере возникают возмущения (магнитосферные суббури), которые проявляются с наибольшей силой в «авроральной» зоне, куда во время возмущений вторгаются мощные потоки заряженных (авроральных) частиц. Визуальным индикатором таких вторжений являются активные формы полярных сияний. Магнитные возмущения в авроральной зоне (называемые также авроральными суббурями) оказывают сильнейшее воздействие на все технические аспекты жизнедеятельности человека в полярных регионах, включая энергетические системы и трубопроводы, системы телекоммуникации, связи и навигации, транспортную и энергетическую инфраструктуру, а также обеспечение безопасности транзитных и трансполярных воздушных маршрутов. Таким образом, разработка методов диагностики и мониторинга состояния аврорального овала (т.е. авроральной зоны в конкретный момент времени) и интенсивности происходящих в нем процессов является, несомненно, актуальной задачей.

В диссертации Ю.В. Пенских эта задача решается с использованием данных магнитных наблюдений на сети станций северного и южного полушарий. На основании магнитных данных рассчитываются системы ионосферных токов, ответственных за магнитные возмущения на земной поверхности, и структура продольных (т.е. текущих вдоль магнитных силовых линий) магнитосферных токов, генерирующих эти ионосферные токи. Для решения задачи был разработан метод, названный авторами «техникой инверсии магнитограмм» (ТИМ), который позволяет определить структуру аврорального овала: приполюсную границу (т.е. границу полярной шапки), экваториальную границу, границу разделяющую зоны противоположно-направленных конвекций, линию максимальной плотности западной и восточной электроструй и область их раздела («разрыв Харанга»), а также пространственно-временное распределение втекающих и вытекающих магнитосферных токов.

Соискатель провёл кардинальную модификацию традиционного метода ТИМ, что существенно повысило точность метода и скорость решения системы уравнений ТИМ. При этом была впервые реализована возможность проведения одновременной

диагностики структуры аврорального овала и процессов, происходящих в ионосфере северного и южного полушарий, что фактически обеспечило физическую обоснованность метода и получаемых при его использовании результатов.

Диссертация состоит из трёх глав, введения и заключения. Во **Введении** сформулированы цели работы и её актуальность, положения, выносимые на защиту, и практическая значимость полученных результатов. Каждая глава также включает разделы с формулировкой соответствующих задач. В **заключении** представлены основные результаты и выводы проведённого исследования.

**Глава 1** содержит описание структуры аврорального овала и происходящих в нём процессов, выявленных при использовании различных инструментов и методов – от первоначальных оптических наблюдений до спутниковых измерений высыпающихся энергичных частиц и продольных магнитосферных токов. Проводится сопоставление современных методов определения структуры аврорального овала, оцениваются их преимущества и недостатки. Делается общий вывод, что авроральный овал может рассматриваться в качестве интегрального показателя магнитосферно-ионосферного взаимодействия, однако применяемые в настоящее время методы не дают той полноты информации, которая может быть обеспечена методом инверсии магнитограмм.

**В главе 2** рассматривается модернизированный метод ТИМ, осуществляющий автоматическое определение структурных границ аврорального овала в северной и южной полярных шапках и представление результатов расчёта в виде трёхмерных интерактивных карт. Подробно описывается один из важных модулей ТИМ – оригинальный метод наибольших вкладов (МНВ), который обеспечивает значительное повышение точности и скорости решения системы линейных алгебраических уравнений в сравнении с другими аналогичными методами, такими как метод бисопряжённых градиентов (BiCGStab), метод сингулярного разложения (SVD) и метод наименьших квадратов (OLS). Эффективность модифицированного метода иллюстрируется на примере суббури 27.08.2001 (03:35 UT), для которой представлены карты двумерных распределений эквивалентной токовой функции и продольных токов в северной и южной полярных областях, рассчитанные разными методами (МНВ, OLS + BiCGStab, SVD). Как показано в работе, все три метода дают подобные распределения токовой функции и продольных токов в северном полушарии. Однако, соответствие карт распределений в северном и южном полушариях достигается только при использовании метода наибольших вкладов (МНВ), при этом магнитные потоки через северную и южную полярные шапки совпадают с точностью до 5%, демонстрируя почти синхронные изменения на протяжении всего суббурового

периода. Этот экспериментальный результат является несомненным свидетельством высокой эффективности модернизированного метода ТИМ.

**Глава 3** содержит описание другого важного модуля модифицированного программного комплекса ТИМ – метода автоматической диагностики структурных границ аврорального овала. На основании выходных данных ТИМ определяются следующие границы: R0 - полярная граница аврорального овала (граница полярной шапки), RB - линия максимума продольных токов зоны 1, RH - линия максимума продольных токов зоны 2, R1 - граница между зонами продольных токов 1 и 2, R2 - экваториальная граница аврорального овала. Расчет структурных границ аврорального овала выполняется автоматически по магнитным данным для северной и южной полярных областей с использованием метода наибольших вкладов МНВ. Отмечено соответствие между границами овала, полученными методом ТИМ и по моделям OVATION, APM, SuperDARN, а также по снимкам овала полярных сияний со спутника IMAGE. Рассмотрен вопрос о соответствии границ аврорального овала в северном и южном полушарии при разных уровнях магнитной активности и в ходе суббури и о соответствии границ вытекающего продольного тока и пояса высыпания авроральных электронов.

Диссертация суммирует результаты исследований, выполненных автором за 5 - летний (судя по публикациям) период работы. Основными из них являются следующие:

1. Осуществлена принципиальная модернизация техники инверсии магнитограмм (ТИМ). Модернизированный метод ТИМ обеспечивает проведение анализа эквивалентных токовых систем с большей скоростью и с повышенной точностью не только в северной, но и в южной полярной области, где низкая плотность станций сети геомагнитных измерений существенно ограничивает использование других методов.

2. Разработан метод и создан алгоритм автоматической диагностики определения структурных границ аврорального овала по выходным данным ТИМ.

3. Выполнены расчёты эквивалентных токовых функций, конвекционных систем и распределения продольных токов, показавшие их хорошее соответствие в северной и южной полярных областях в ходе конкретных возмущений.

4. Выполнены расчёты структурных границ аврорального овала в северной и южной полярной областях и проведён анализ их соответствия в ходе магнитной бури и при разных уровнях магнитной активности.

Таким образом, диссертантом был разработан и внедрён в практику новый эффективный метод исследования геофизических процессов, происходящих в полярных областях Земли, с использованием данных наземных магнитных измерений. К работе могут быть сделаны следующие замечания:

1. Карты распределения продольных токов, построенные для суббури 17.08. 2001 и 27.08.2001, показывают наличие интенсивных продольных токов внутри полярной шапки в ходе суббури. В частности, на фазе роста суббури 27.08.2001 в 03:34 UT (рис. 3.7) вытекающий продольный ток наблюдается на широте  $\sim 80^\circ$  в утреннем секторе ( $\sim 03$  MLT), на взрывной фазе (04.17 UT) наиболее интенсивные токи фиксируются в околополюсной области (широта  $\sim 83^\circ$ ): в вечернем секторе на широте  $\sim 83^\circ$  – вытекающий продольный ток, в утреннем секторе на широте  $\sim 87^\circ$  – втекающий ток, на фазе восстановления эти токи меняют полярность. Как указано в диссертации, появление вытекающего продольного тока на широте  $\sim 80^\circ$  в утреннем секторе обусловлено влиянием азимутальной Ву компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). В южной шапке соответствующие продольные токи на широте дневного каспа не обнаруживаются (Рис. 3.5), как это и должно быть в условиях низкой проводимости полярной ионосферы в зимний сезон.

Природа продольных токов в околополюсной области в диссертации не обсуждается. Согласно известным экспериментальным данным, токи противоположной полярности (втекают в вечерние часы, вытекают в утренние) могут фиксироваться в околополюсной области, но только при северной ориентации  $V_{ZM}$  ММП, что не соответствует ситуации, показанной на Рис. 3.7. С другой стороны, в полярную шапку могут смещаться продольные токи, типичные для ночного сектора полярного овала («клин Биркеланда»), но только в случае экстремально интенсивных суббурь, но такие токи являются частью планетарной R1 FAC системы и не имеют отношения к токам полярной шапки.

Характерно, что представленные на том же Рис. 3.7 результаты расчётов продольных токов, выполненные для суббури 27.08.2001 по моделям OVATION и APM, не показывают никаких продольных токов в околополюсной области, также как и данные спутника IMAGE по сияниям. При этом карты усреднённого распределения продольных токов в суббуревых условиях ( $100 < AE < 300$ ,  $300 < AE < 600$  и  $600 < AE$  nT), построенные методом ТИМ по данным за 250 суток, показывают очень слабые продольные токи в северной полярной шапке (Рис. 3.11), но весьма интенсивные продольные токи в южной полярной шапке с полярностью типичной для FAC NBZ (Рис. 3.12), чему не может быть никакого рационального объяснения.

Таким образом, модифицированный метод ТИМ обеспечивает реальное распределение эквивалентных токовых функций в северной и южной полярных шапках, корректное положение экваториальной и полярной границ аврорального овала, локализацию максимума плотности авроральных электроджетов и границ обращения ионосферной конвекции, но даёт противоречивую информацию о продольных токах в области полярной шапки.

Следующие два замечания касаются качества представления материала.

2. Чрезмерное использование в тексте различных аббревиатур (иногда в английском, иногда в русском варианте) затрудняет чтение диссертации. При этом в автореферате диссертации, предназначенном для массового читателя, при описании метода автоматической диагностики границ аврорального овала (глава 3), эти границы даже не называются.

3. В диссертации не даётся сведений о геофизической обстановке в ходе магнитной суббури 27.08.2001, хотя именно этой суббуре в диссертации уделяется основное внимание, тогда как геофизическая обстановка во время суббури 17.08.2001 иллюстрируется двумя рисунками (Рис. 2.7 и 2.9)

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств работы.

Диссертации Ю.В. Пенских является серьёзным, экспериментально и теоретически обоснованным исследованием, в результате которого был разработан и внедрён в практику новый метод диагностики структуры аврорального овала, как интегрального показателя магнитосферно-ионосферного взаимодействия, по данным магнитных наблюдений в северной и южной полярных областях. Работа Ю.В. Пенских полностью соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Я, Трошичев Олег Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Официальный оппонент, Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ»), доктор физ.-мат. наук (01-04-12 –Геофизика), профессор

19.04.2022 г.

Адрес: 199397, Санкт\_Петербург, ул. Беринга 38,  
Телефон, e-mail,: +7(812)337-31-34, olegtro@aari.ru

О.А.Трошичев

