

УДК 550.383+550.388

ЭВОЛЮЦИЯ СЕВЕРНОГО АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. А. А. Петрова^{1, *}, О. В. Латышева^{1, **}

¹Санкт-Петербургский филиал Федерального Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: aa_petrova@inbox.ru

**e-mail: l-olli@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 08.02.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

Активное освоение Арктики, увеличение интенсивности судоходства по Северному морскому пути и авиалиний в воздушном пространстве Северного Ледовитого океана привлекает внимание к проблеме нарушений трансполярного распространения радиоволн. В высокоширотных областях прохождение навигационных сигналов систем глобального позиционирования зависит от состояния ионосферы. Во время геомагнитных возмущений развиваются ионосферные неоднородности, приводящие к помехам систем спутникового позиционирования. Положение и форма полярных сияний зависят от состояния магнитосферы. В процессе работы впервые выполнен расчет компонентной модели магнитного поля авроральной зоны на основе обновляемой цифровой модели полных значений компонент магнитного поля Земли СПбФ ИЗМИРАН. Магнитное поле авроральной зоны рассчитано для высот от 0 до 1000 км на период с 1900 по 2023 гг., в том числе для высоты 100–110 км, где интенсивность полярных сияний достигает максимума в околоземном космическом пространстве Арктики. Оценка пространственного смещения овала полярных сияний проведена за период с 1957 г. (его первого математического описания) по настоящее время. Как показал анализ, смещение границ овала полярных сияний за рассмотренный период происходило во времени и в пространстве сонаправленно перемещению изолиний экстремумов горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля авроральной зоны северного полушария.

Ключевые слова: Овал полярных сияний, постоянное магнитное поле авроральной зоны Арктики.

DOI: 10.31857/S0016794024050101, **EDN:** QPZEMF

1. ВВЕДЕНИЕ

Полярные сияния — наиболее известные визуальные проявления повышенной активности “космической погоды”. Термин “космическая погода” относится к условиям состояния Солнца, магнитосферы и ионосферы, которые оказывают влияние на космическую, морскую и воздушную навигацию.

В высокоширотных регионах прохождение навигационных сигналов систем глобального позиционирования зависит от состояния ионосферы. Причиной нарушения работы спутников и навигационных систем могут быть физические процессы в авроральной зоне — области, занимаемой полярными сияниями. Предсказание “космиче-

ской погоды” является одной из приоритетных задач геофизики [Maffei et al., 2023].

Основную роль в динамике ионосферы играет высыпание высокоэнергичных частиц — протонов и электронов. Заряженные частицы плазмы солнечного ветра проникают в ионосферу вдоль силовых линий магнитного поля Земли (МПЗ), вызывая полярные сияния. Кроме того, в результате высыпания заряженных частиц во время геомагнитных возмущений развиваются ионосферные авроральные неоднородности, которые создают флуктуации амплитуды и фазы трансionoсферных радиосигналов. Доминирующим источником воздействия на навигационный сигнал в высокоширотных областях являются флуктуации полного электронного содержания (ПЭС). Флуктуации приводят к срывам приема сигналов гло-

бальных навигационных спутниковых систем. Это создает помехи систем спутникового позиционирования, ведет к сбоям навигационных параметров, влияет на распространение транс-ионосферных радиоволн и коротковолновой радиосвязи [Захаров и др., 2020; Системный мониторинг..., 2019].

В работах [Филатов и Черноус, 2017; Филатов и др., 2015; Черноус и др., 2016; 2018a; Chernous et al., 2018; Sigernes et al., 2012] опубликована методика оценки параметров оптического овала полярных сияний, позволяющая прогнозировать положение овала неоднородностей ПЭС. Прогноз овала неоднородностей представляет особый интерес для повышения качества работы навигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS.

Авроральные овалы представляют собой отклик магнитосферы на усиление электромагнитных возмущений [Черноус и др., 2018]. Дискретные формы полярных сияний являются независимым признаком присутствия ионосферных авроральных неоднородностей, флуктуации которых влияют на распространение транс-ионосферных радиосигналов [Черноус и др., 2018; 2018б; 2018в]. Конфигурация полярных сияний и неоднородностей ПЭС имеют форму овалов на высотах около 80–200 и 200–450 км соответственно. Данные о пространственно-временном распределении полярных сияний являются маркером состояния овала неоднородностей ПЭС, ответственных за распространение навигационных сигналов, в области высокоширотной ионосферы [Филатов и др., 2015].

Сияния аврорального овала возникают в околоземном пространстве в зоне высыпания заряженных частиц на высотах от 80 до 200 км и пространственно определяются геометрией силовых линий МПЗ. Однако в последние десятилетия в северном полушарии наблюдалось значительное изменение величины и направления вектора МПЗ, в результате которого произошло ускорение движения магнитного полюса (МП). В условиях изменения МПЗ представляет интерес изучение эволюции компонент постоянного магнитного поля и пространственного смещения овала полярных сияний. Современное положение овала полярного сияния в настоящее время может отличаться от его местоположения, описанного математически в 1967 г. [Хорошева, 1961, 1967; Feldstein and Starkov, 1967; Kopytenko et al., 2019; Oguti, 1993]. Динамика аврорального овала может служить индикатором смещения овала неоднородностей ПЭС, нарушающих функционирование космических навигационных систем в высокоширотных областях Арктики.

Цель данной работы состоит в построении компонентной модели постоянного магнитного поля авроральной зоны на основе модели магнитного поля Земли СПбФ ИЗМИРАН, исследовании эволюции компонентной модели авроральной зоны Арктики с 1900 г. и оценке пространственно-временных изменений местоположения северного аврорального овала.

2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СМЕЩЕНИЕ СЕВЕРНОГО АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА В СВЕТЕ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

2.1. Овал полярных сияний как отклик состояния высокоширотной ионосферы

Свечение аврорального овала создается заряженными частицами плазмы солнечного ветра и топологически определяется геометрией силовых линий МПЗ. Спектр сияний зависит от высоты свечения и от энергии вторгающихся частиц. Свечение высокоширотной ионосферы на высотах 100–150 км возбуждается в результате вторжения в атмосферу энергичных частиц и воздействия геомагнитных возмущений. Активные формы свечения связаны с электронами, вторгающимися в атмосферу и обладающими энергией порядка 1–10 кэВ. Сильные отклонения амплитуды и фазы транс-ионосферных сигналов возникают из-за рассеяния сигнала на мелкомасштабных неоднородностях электронной плотности [Захаров и др., 2020], большие изменения приводят к срыву приема сигнала. Эти процессы могут иметь заметное влияние на состояние магнитосферы и ионосферы и являются важными факторами космической погоды [Petrukovich et al., 2015].

Благодаря излучению возбужденных атомов и молекул атмосферных газов в видимом диапазоне на высотах 110–120 км наблюдается зеленоватое свечение азота и кислорода. Красное свечение кислорода наблюдается на больших высотах (200–450 км), где частота соударений ниже, и сияния возбуждаются более мягкими частицами. Особый тип сияний наблюдается во время сильных вспышек солнечных космических лучей. Проникая в полярную шапку и область квазизахвата, в моменты сильных событий солнечные протоны вызывают красное свечение, равномерное распределенное по всему небу.

Авроральный овал представляет собой проекцию низкоширотной магнитосферы на ионосферу и показывает картину распределения сияний над полярной областью Земли.

В планетарном масштабе местоположение аврорального овала было зафиксировано в зимний период Международного геофизического года 1957-1958 гг. (МГГ) по данным сети непрерывно работающих оптических камер на десятках станций в Арктике и Антарктике. Измерения сравнивались по согласованным методикам с прямыми наблюдениями положения видимого полярного сияния. Эксперимент подтвердил форму кольца в области полярных сияний, его асимметрию и непрерывность. Исследователи использовали десятки камер C-180, фотографирующих небо с углом поля зрения равным 180° с охватом линии горизонта, и их спектральных модификаций C-180-S и обработали тысячи снимков авроры в полярных шапках. Для описания полярного сияния на визоплотах использованы три координаты: время (UT), геомагнитная широта и долгота. В 1961 году мгновенная модель полярных сияний, основанная на экспериментальных данных камер всего неба, была представлена О.Б. Хорошевой [Хорошева, 1961]. На основе полученных данных сделано математическое описание модели аврорального овала 1957 года [Хорошева, 1967; Feldstein and Starkov, 1967].

С начала 20-го века в связи со значительным изменением величины и направления вектора индукции МПЗ в северном полушарии вопрос о дрейфе аврорального овала стал актуальным. В ряде работ по разным моделям сделана оценка смещения овалов полярных сияний [Kataoka and Nakano, 2021; Maffei et al., 2023; Oguti, 1993; Tsyganenko, 2019].

В расчетах Т. Oguti [Oguti, 1993] оценены ожидаемые долгосрочные изменения формы и размера овала с конца двадцатого века на 1000 лет вперед в северном и южном полушариях. Исследование основывалось на представлении магнитного поля Земли сферическими гармониками и прямой экстраполяции его вековых изменений. Предполагалось, что интенсивность составляющих магнитного поля высокого порядка остается постоянной. В данной работе не принималась во внимание вероятная взаимосвязь между интенсивностью членов более высокого порядка и интенсивностью диполя, исследование не включало никакой модели магнитосферы. Овальные формы полярных сияний были определены как местоположения вершин изолиний магнитного поля, рассчитанного на основе дипольной модели, с величиной поля в пределах интервала от 49 до 173 нТл.

В работе [Tsyganenko, 2019] представлены результаты определения овала полярных сияний с использованием модели постоянного магнит-

ного поля Земли IGRF-12 [Thébault et al., 2015] совместно с моделью внешнего поля, соответствующей среднему слегка возмущенному состоянию магнитосферы. Автор исследует влияние вековых вариаций главного поля, не учитывая эффект влияния изменений межпланетных условий [Tsyganenko, 2019]. При рассмотрении временного интервала с 1965 по 2020 год было обнаружено, что вековой дрейф северного полярного овала приводит в Северном полушарии к его смещению в пределах $\sim 4^\circ$ по широте, приблизительно в направлении географического меридиана 100°E , что соизмеримо с одновременным сдвигом централизованного, эксцентричного и скорректированного геомагнитных полюсов. Показано, что все эти сдвиги в 4-5 раз меньше, чем резкое смещение северного МП [Tsyganenko, 2019].

В работе [Kataoka and Nakano, 2021] исследована глобальная форма авроральной зоны за последние 3000 лет с использованием моделей палеомагнетизма. Для описания авроральной зоны используется метод, аналогичный предложенному Огути [Oguti, 1993], при этом в модели магнитного поля Земли IGRF-13 учтены не только диполь, но и коэффициенты Гаусса более высокого порядка.

В исследовании [Maffei et al., 2023] геомагнитное поле для авроральных и “опасных зон” с 1900 по 2020 годы описывается моделью поля IGRF-13 с учетом влияния различных вариантов интенсивности межпланетного магнитного поля. Авторами оценена эволюция полярных сияний и опасных зон в течение следующих 50 лет. Прогноз показал, что канадский участок ослабнет и сместится в сторону Сибири, в то время как Сибирский участок усилится. В работе сделано предположение, что недавний быстрый дрейф Северного МП может быть объяснен ослаблением высокой напряженности магнитного поля над Канадой и усилением магнитного поля над Сибирью, что привело к дрейфу в сторону Сибири всей магнитной картины, так как дрейф Северной зоны полярных сияний от Северной Америки к Сибири качественно согласуется с быстрыми перемещениями Северного МП. Средний прогноз предсказывает дрейф северной зоны от Северной Америки к Сибири. Аналогичный дрейф можно наблюдать и в положении Северного геомагнитного полюса, хотя направление его дрейфа не полностью коррелирует с направлением смещения авроральной зоны [Maffei et al., 2023].

В настоящее время ведется непрерывная регистрация параметров верхней ионосферы со спутников. Диагностика состояния в высокоширотных зонах Арктики и ее изучение осуществля-

ется методом внешнего зондирования ионосферы на основе полярных спутников, находящихся на орбитах в интервале высот 800–1100 км. Кроме того, спутниками измеряются параметры солнечного ветра и межпланетное магнитное поле на орбите *LI* на высоте 1.6 млн км вверх от Земли для изучения типов высыпаний электронов и протонов, которые сильно коррелируют с полярным сиянием.

В 2009 году в Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Хопкинса была построена модель прогноза интенсивности полярного сияния OVATION. Используя спутниковые скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, модель учитывает три типа высыпаний электронов и протонов. Достоверность прогнозов по модели OVATION при сравнении с визуальными наблюдениями с фиксацией событий с наземных камер достигает 86% [Николаев и др., 2021; Case et al., 2016; Kalb et al., 2023; Machol et al., 2012; Mooney et al., 2021; Newell et al., 2009].

При высыпании электронов и протонов в полярную ионосферу основная эмиссия полярных сияний происходит одновременно с ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы [Черноус и др., 2016]. Неоднородности ПЭС, определяющие распространение трансionoсферных сигналов навигационных спутников, в период авроральной суббури связаны с дискретными формами сияний. Данные отечественных измерений демонстрируют тенденцию к сходству пространственно-временных вариаций неоднородностей ПЭС и динамики структур северных сияний. В результате исследований обнаружена овальная структура пространственно-временного распределения не только полярных сияний, но и неоднородностей ПЭС, проецирующихся на разных высотах ионосферы [Черноус и др., 2018; Kopytenko et al., 2019]. В работе [Maffei et al., 2023] область неоднородностей ПЭС рассматривается как “опасная зона”, в которой обнаружены электромагнитные помехи, нарушающие радиосвязь. Выполнена оценка эволюции зон полярных сияний и овалов “опасных зон” неоднородностей ПЭС в течение следующих 50 лет. Показано, что для обоих овалов может произойти смещение в более низкие широты в сторону Северной Европы и России, а в Северной Америке возможно поднятие овалов в более высокие широты [Maffei et al., 2023].

Мониторинг положения овала полярных сияний можно использовать в качестве диагностического инструмента для оценки местоположения овала вариаций неоднородностей ПЭС, влияющих на качество приема и распространение на-

вигационных сигналов GPS/ГЛОНАСС, что позволит повысить точность позиционирования в Арктике с помощью спутниковых навигационных систем [Черноус и др., 2016; 2018в]. Таким образом, появляется возможность практического использования характеристик полярного овала в современную эпоху в радиофизических исследованиях.

Проверка пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС и овала полярных сияний в планетарном масштабе проведена для случаев с различной геомагнитной возмущенностью. Было показано, что оба распределения имеют подобную овальную структуру, а толщина аврорального овала находится в соответствии с ростом числа неоднородностей ПЭС. Соответствие пространственно-временного распределения сияний аврорального овала и пространственно-временных изменений параметров сигнала навигационных спутников, определяемых региональными и локальными неоднородностями ПЭС, продемонстрировано в ряде работ [Черноус и др., 2018, 2018а, 2018б, 2018в; Astafyeva et al., 2014; Шагимура-тов и др., 2021].

Наибольшее количество сбоев при определении ПЭС в периоды геомагнитных бурь наблюдается вблизи аврорального овала [Astafyeva et al., 2014]. В работах [Захаров и др., 2020; Шагимура-тов и др., 2021] показано, что сбои сигнала GPS, снижающие точность позиционирования, происходят преимущественно внутри аврорального овала, отражая динамику процессов в ионосферной плазме высоких широт.

В процессе работы была рассмотрена эволюция компонент магнитного поля авроральной зоны и особенности смещений овалов полярных сияний, получаемых на основе прогнозов по моделям OVATION и Aurora Forecast 3D [Breedveld, 2020; Machol et al., 2012; Newell et al., 2009, 2014; Sigernes et al., 2011, 2012]. Трехмерной моделью The Aurora Forecast 3D авторы пользуются только для получения визуального представления о положении полярного овала в текущий момент времени [Kopytenko et al., 2019; Sigernes et al., 2011, 2012]. Поскольку авторы модели Aurora Forecast 3D не предоставляют информации о вероятности визуального подтверждения аврорального овала [Breedveld, 2020], в настоящем исследовании использованы прогнозы модели OVATION, публикуемые в цифровом виде.

При использовании расчетов по модели OVATION можно получать “прогнозируемое положение овала полярных сияний в данный момент времени” [Machol et al., 2012]. Модель OVATION на основе измерений параметров сол-

нечного ветра (скорости солнечного ветра, компонент межпланетного магнитного поля и плотности электронов), полученных спутником Advanced Composition Explorer (ACE) до 2016 года, а затем космическим аппаратом Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) после 2016 года, используя функцию связи Ньюэлла, прогнозирует возможность наблюдений видимого ночного полярного сияния в определенном месте в течение часа, что подтверждено с вероятностью 86% [Николаев и др., 2021; Case et al., 2016; Machol et al., 2012; Mooney et al., 2021; Newell et al., 2009].

Авторами данной работы исследовано несколько сотен прогнозов по модели OVATION за период с 2009 по 2023 гг.

События с 2009 рассмотрены на основе сети фоторегистраторов небосвода (all-sky камер), где использовались непрерывные наблюдения полярных сияний на станции Баренцбург (Шпицберген), прямые оптические измерения на станциях Кольского полуострова (Ловозеро) и Северной Скандинавии (Соданкюля, Кируна), а также прогнозы по модели OVATION в графическом виде в географических координатах [Филатов и др., 2015; Kopytenko et al., 2019; Newell et al., 2014; Sigernes et al., 2011, 2012]. С 2019 г. авторами используются и ежедневно сохраняются данные прогноза по модели OVATION в матричном виде (сеточном формате *.grd) в географических координатах с временным интервалом 10 и 30 минут для всего земного шара.

В процессе работы проведен мониторинг эволюции компонент МПЗ авроральной зоны и местоположения северного аврорального овала с 1957 г. по настоящее время. Определение современного местоположения полярного овала имеет большое практическое значение, так как наличие пространственно-временной связи полярных сияний и возмущений неоднородностей полярной ионосферы, влияющих на распространение сигналов навигационных спутников, дает возможность осуществить прогноз состояния ионосферы и условий приема GPS/ГЛОНАСС сигналов. Это повышает ситуационную осведомленность позиционирования в акватории Северного морского пути и воздушном пространстве Северного Ледовитого океана.

2.2. Исследование геомагнитного поля авроральной зоны Арктики

С целью получения представлений об изменении параметров магнитного поля околоземного космического пространства за период 1900–2023 гг. создана компонентная модель поля авроральной зоны северного полушария. Модель

получена на основе векторной модели постоянного МПЗ СПбФ ИЗМИРАН [Копытенко и Петрова, 2016, 2020; Петрова, 2015; Петрова и др., 2022].

Санкт-Петербургский филиал Института Земного магнетизма (СПбФ ИЗМИРАН) занимается изучением пространственного распределения компонент магнитного поля Земли и его вековых вариаций на территории России и акватории Мирового океана с 1930 гг. Векторная модель полных значений модуля и компонент МПЗ СПбФ ИЗМИРАН построена по магнитометрической базе элементов земного магнетизма для земного шара.

На основе данных компонентной генеральной съемки, гидромагнитных измерений элементов магнитного поля Земли в Мировом океане на маломагнитной шхуне НИС “Заря” и аэромагнитных компонентных измерений была организована собственная база измеренных данных по векторным составляющим геомагнитного поля под управлением специализированной системы накопления, хранения и обработки информации [Копытенко и Петрова, 2016; Петрова, 2015].

Магнитометрическая база обобщает материалы аэромагнитных и гидромагнитных измерений, а также расчетные значения элементов МПЗ, вычисленные по модульной информации аэро- и гидромагнитных съемок [Копытенко и Петрова, 2016, 2020].

На основе магнитометрической базы данных построена цифровая трехмерная модель компонент вектора индукции МПЗ, создано новое поколение цифровых магнитных карт компонент МПЗ для земного шара и околоземного пространства в диапазоне высот от 0 до 800 км, востребованном морской, воздушной и космической магнитной навигацией [Копытенко и Петрова, 2016, 2018а; Копытенко и др. 2019, 2019а, 2021; Петрова, 2015; Петрова и др., 2022].

В качестве уровня относимости цифровой модели элементов магнитного поля используется главное магнитное поле модели IGRF 13-го поколения, которое представляет собой модель со сферическими гармоническими коэффициентами Гаусса, предназначенными для периода 1900–2025 гг. [Alken et al., 2022; Brown et al., 2020].

Векторная модель МПЗ СПбФ ИЗМИРАН была верифицирована по результатам сопоставления модельных значений с векторными данными Мировой сети геомагнитных обсерваторий, аэромагнитных съемок и спутниковых измерений КА CHAMP и Swarm [Копытенко и др., 2019, 2019а, 2021; Петрова и Латышева, 2020; Petrova et

al., 2022; Thébault et al., 2016; Alken et al., 2021, 2022; Olsen and Pauluhn, 2019; Sabaka et al., 2018].

Векторная модель магнитного поля служит основой для описания конфигурации постоянно-го магнитного поля авроральной зоны. Знание топологии магнитного поля используется для изучения изменений магнитосферы Земли [Пудовкин и Семенов, 1985; Трошичев, 1986; Longcore, 2005; Marchaudon et al. 2005; Zhang et al. 2021].

Для выявления изменений магнитного поля авроральной зоны и пространственного положения северного аврорального овала проведен анализ эволюции компонент магнитного поля с момента первого математического описания овала в 1957 г. по настоящее время. Рассмотрена динамика изменений полных значений модуля (F), вертикальной (Z), горизонтальной (H), северной (X), восточной (Y)-компонент, магнитного склонения (D) и наклонения (I). На основе векторной модели рассчитаны магнитные карты компонент авроральной зоны околоземного космического пространства от поверхности Земли до

высоты 1000 км. Эволюция горизонтальной компоненты авроральной зоны в пространстве, во времени и с высотой показана на рисунках 1, 2.

Зона аврорального овала наблюдается на высотах 80–120 км, на высотах более 400–450 км выявляется область овала ионосферных неоднородностей [Захаров и др. 2020; Системный мониторинг ионосферы..., 2019; Черноус и др. 2018]. Для получения представления о параметрах магнитного поля околоземного космического пространства авроральной зоны вычислены значения модуля и компонент на высотах 0, 20, 30, 50, 80, 100, 120, 150, 200, 400, 600 км и 1000 км. Это позволило охарактеризовать особенности эволюции магнитного поля на высотах овала полярного сияния в период 1957–2023 гг. и овала ионосферных неоднородностей (рис. 1, рис. 2).

В работе [Maffei et al., 2023] сделано предположение, что недавний быстрый дрейф Северного МП может быть объяснен ослаблением магнитного поля над Канадой и усилением магнитного поля над Сибирью.

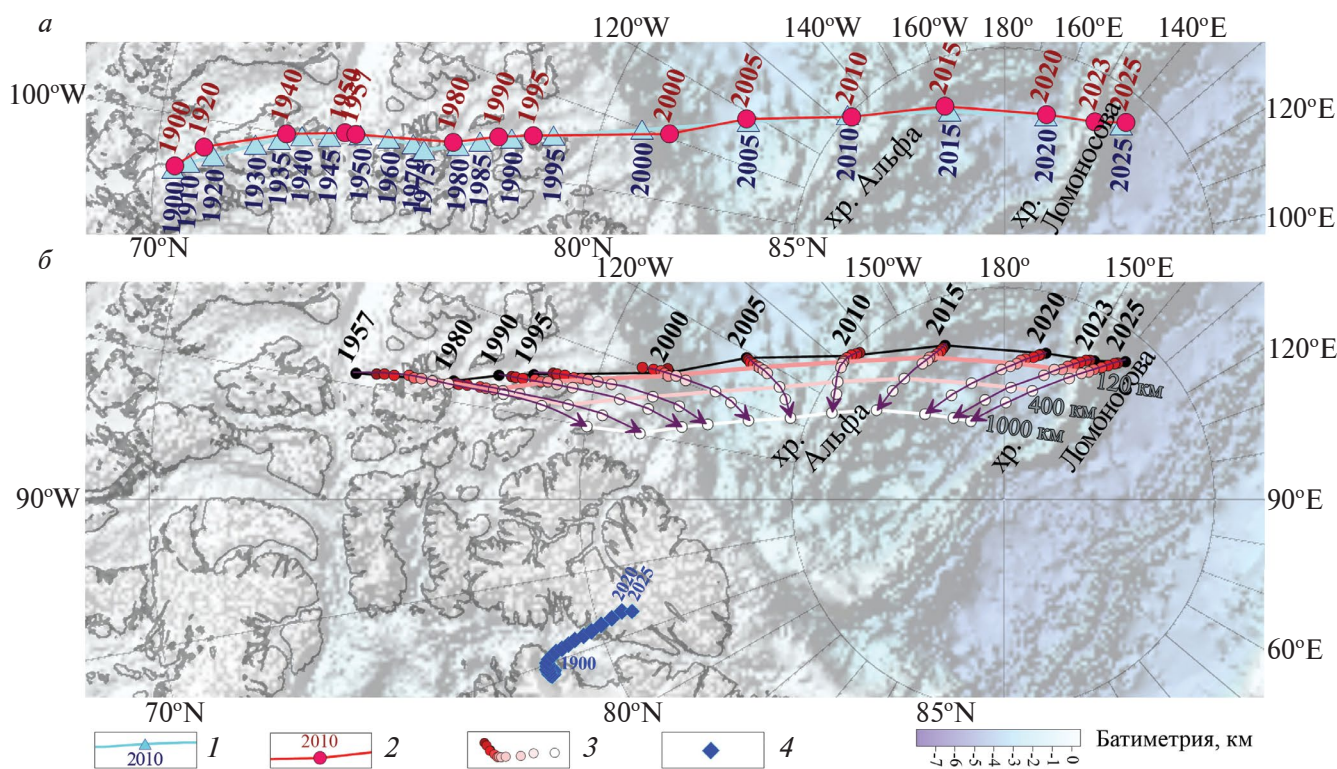


Рис. 1. Продвижение МП за период с 1900 по 2025 гг. (а) – Положение МП на земной поверхности; (б) – нулевая изолиния H -компоненты постоянного МПЗ на высотах до 1000 км. 1 – Положение МП по модели IGRF 13 (1900–2025 гг.); 2 – положение МП по H -компоненте магнитного поля авроральной зоны для высоты 0 км; 3 – эволюция положения МП с 1957 по 2025 гг. на высотах от 0 до 1000 км (модель СПбФ ИЗМИРАН); 4 – геомагнитный полюс 1900–2025 гг.

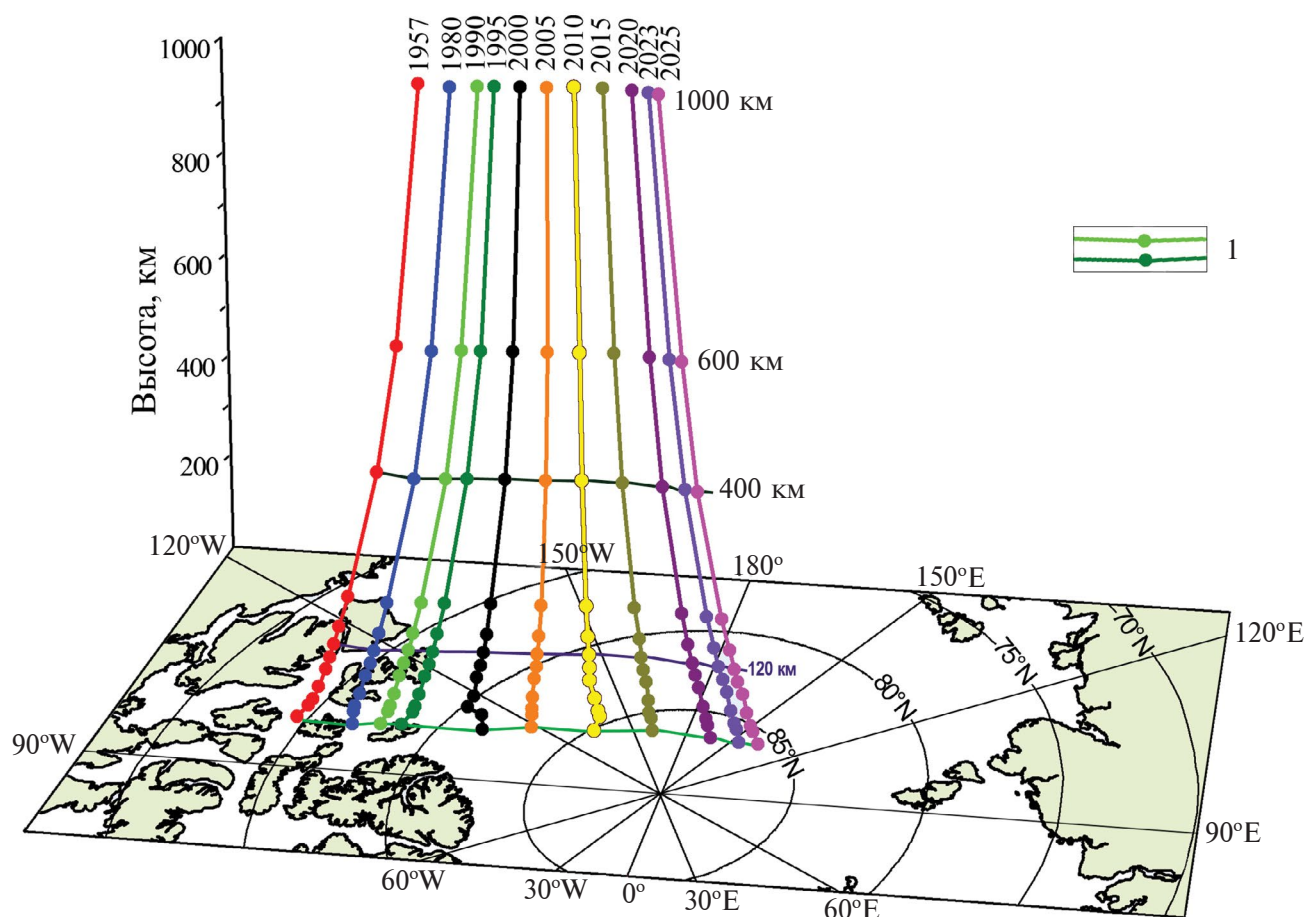


Рис. 2. Эволюция положения МП в период с 1957 по 2025 гг. на высотах от 0 до 1000 км. 1 – Траектория перемещения МП по H -компоненте МПЗ на высотах 0, 120, 400 км (модель СПбФ ИЗМИРАН).

Однако анализ магнитного поля авроральной зоны северного полушария показал, что сонаправленное движение овала полярных сияний и магнитного поля прослеживается только в H - и Z -компонентах. Кроме того, “ослабление магнитного поля над Канадой и усиление магнитного поля над Сибирью” связаны именно с изменением Z -компоненты. В период с 1957 по 2023 гг. смещение экваториальных границ овала полярных сияний произошло в направлении траектории движения минимума горизонтальной компоненты со сдвигом на юг, задаваемым перемещением максимумов значений Z -компоненты магнитного поля авроральной зоны (Z_s) (рис. 3).

Изменение положения МП на земной поверхности по модели IGRF с 1900 по 2025 гг. приведено на рис. 1а [Alken et al., 2021; <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>]. Нулевая изолиния H -компоненты МПЗ, определяющей положение МП авроральной зоны на высотах от 0 до

1000 км, представлена на рис. 1б и рис. 2 на период 1957–2025 гг. (модель СПбФ ИЗМИРАН) [Копытенко и Петрова, 2020].

Повысотные расчеты компонент позволили оценить особенности топологии магнитного поля авроральной зоны с 1900 по 2023 гг. и получить представление об эволюции экстремумов H - и Z -компонент магнитосферы (рисунки 1–6).

МП перемещается по траектории нулевой изолинии H -компоненты. С 1900 по 2023 гг. в Арктике МП продвинулся по земной поверхности на 2500 км. Расчеты H -компоненты до 1000 км показали, что с высотой длина траектории МП укорачивается (рис. 1). Если на поверхности Земли за период с 1957 по 2023 гг. она составила 1900 км, то на высоте 120 км – 1700 км, на высоте 200 км – 1600 км, на высоте 400 км – 1400 км и на высоте 1000 км – 1000 км (рис. 2).

Анализ показал, что с 1957 г. по настоящее время недипольные части магнитного поля – Ка-

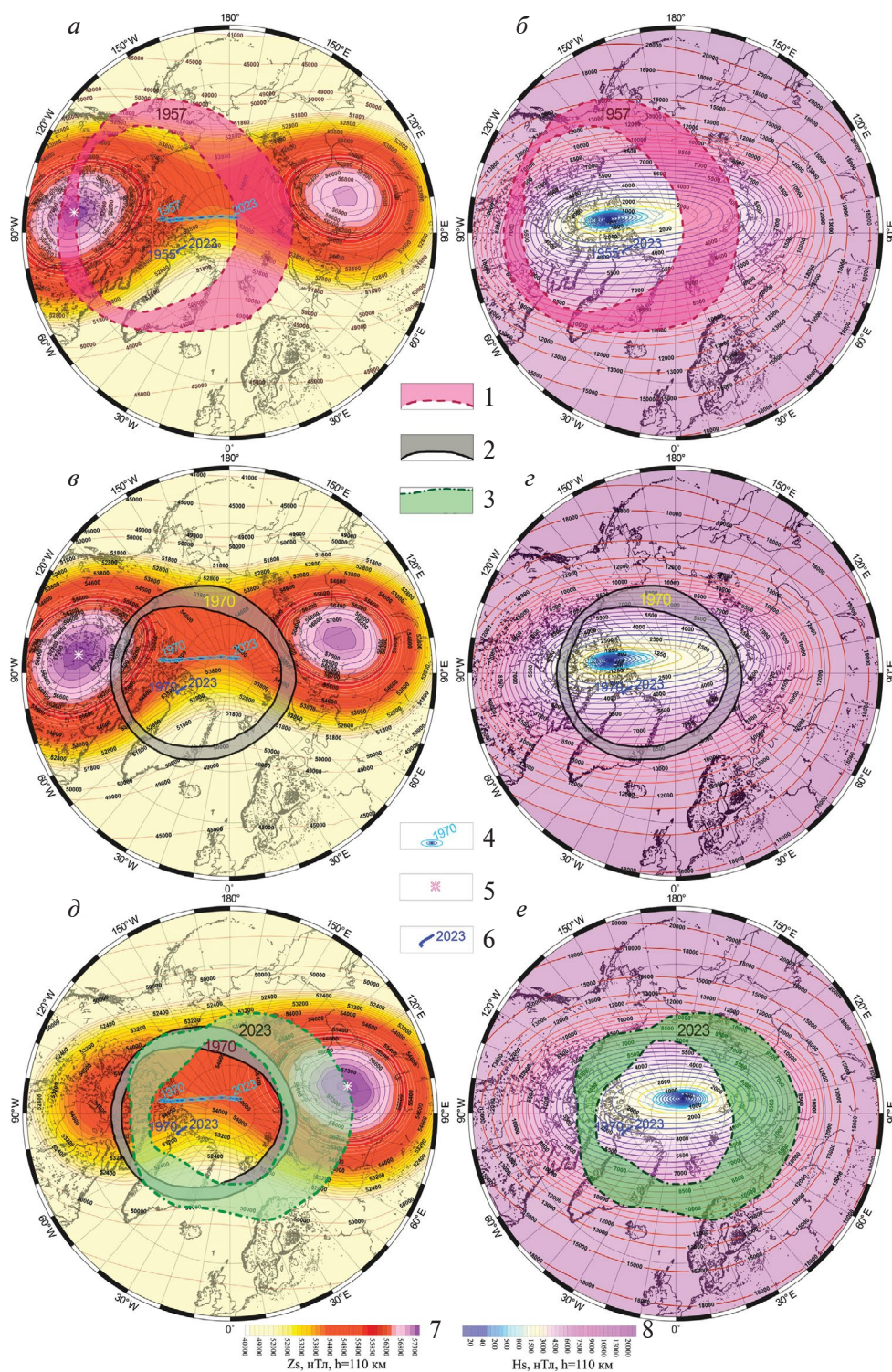


Рис. 3. Эволюция овала полярных сияний в спокойный период геомагнитной активности:

(а, б) – Z - и H -компоненты МПЗ, 1957 г.; (в, г) – Z - и H - 1970 г.; (д, е) – Z - и H -компоненты МПЗ, 2023 г. 1 – овал 1957 г.; 2 – овал 1970 г., 3 – овал 17.01.2023 г. ($Kp = 3$); 4 – перемещение минимумов H с 1957 по 2023 г. на высоте 110 км; 5 – зона максимума Z -компоненты магнитного поля авроральной зоны на границе овала в спокойный день; 6 – геомагнитный полюс 1900–2023 гг.; 7 – изолинии Z -компоненты магнитного поля авроральной зоны (высота 110 км); 8 – изолинии H -компоненты МПЗ (высота 110 км).

надская и Восточно-Сибирская аномалии, изменяющиеся по величине и направлению, меняют полные значения вектора МПЗ. Возможно, что ускорение перемещения МП происходит из-за уменьшения значений модуля мировой Канадской аномалии вблизи поверхности Земли больше чем на 4000 нТл за период с 1957 по 2023 гг. Недипольные части претерпевают изменения в пространстве и во времени одновременно с изменением положения полярного овала.

Наиболее существенные изменения произошли в значениях Z -компоненты в период с 1957 г. по 2023 гг. В 1957 г. на высоте 120 км Канадская магнитная аномалия имела полное значение Z -компоненты $Z_s > 57000$ нТл. Но к 2023 г. Z -компонента Канадской аномалии заметно уменьшилась, и в настоящее время имеет значение $Z_s = 54700$ нТл. При этом центр Канадской магнитной аномалии сместился в северном направлении на 1000 км (рис. 3).

За этот же период максимум Z -компоненты Сибирской аномалии увеличился на 500 нТл от значения $Z_s = 57000$ нТл в 1957 г. до $Z_s = 57500$ нТл в 2023 г., а центр Сибирской магнитной аномалии сместился в западном направлении на шесть градусов с меридиана 108° до 102° Е (рис. 3).

Кроме того, повысотные расчеты магнитного поля авроральной зоны выявили пространственные изменения Z -компоненты с высотой. Исследования показали, что меняется не только интенсивность Канадской и Сибирской мировых магнитных аномалий, но и расстояние между ними, так как с высотой аномалии сближаются (рис. 4). В период с 1957 по 2023 гг. вблизи земной поверхности максимумы Z -компоненты находились на удалении ~ 6200 км. На высоте полярного овала 100–120 км в спокойные дни расстояние между максимумами Z уменьшилось на 20 км. На высоте овала в возмущенные дни – 200 км – расстояние сократилось на 100 км. На высотах овала ионосферных неоднородностей ПЭС (400 км) рас-

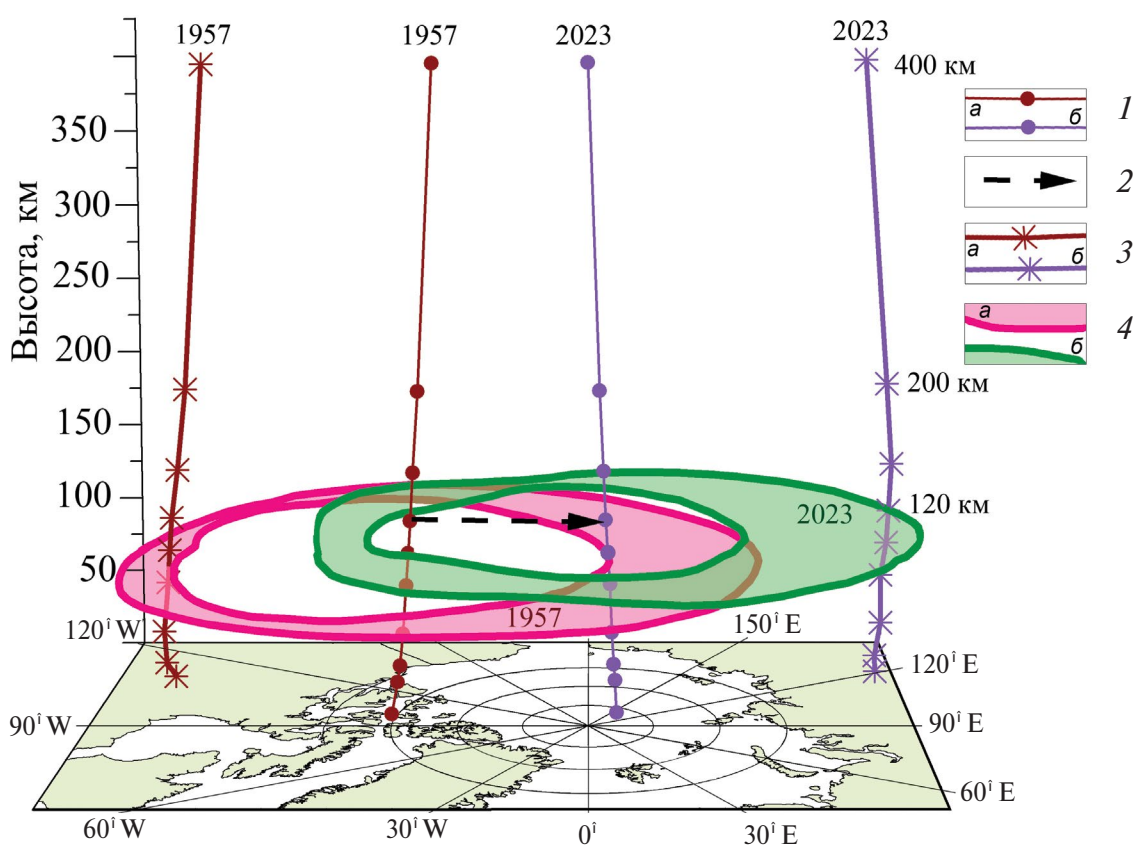


Рис. 4. Положение овалов северных сияний 1957 и 2023 гг. в условиях слабой геомагнитной активности. 1 – положения МП до высоты 400 км ((a) – 1957 г., (б) – 2023 г.); 2 – траектория МП с 1957 по 2023 гг. на высоте 120 км; 3 – положения максимумов Z -компоненты МПЗ до высоты 400 км и на краях овалов: (a) – 1957 г., (б) – 2023 г.; 4 – северные авроральные овалы: (a) – 1957 г., (б) – овал 17.01.2023 г. ($Kp = 3$) по прогнозу модели OVATION.

стояние между максимумами Z уменьшилось до 5700 км, на высоте около 1000 км до 4500 км. Таким образом, от земной поверхности до 1000 км расстояние сократилось на 1700 км.

На фоне изменений H - и Z -компонент магнитного поля авроральной зоны с 1957 по 2023 гг. северный авроральный овал переместился от центра Канадской магнитной аномалии в сторону центра Сибирской магнитной аномалии (рис. 3, рис. 4). Овал полярных сияний за этот период продвинулся коллинеарно траектории движения минимума горизонтальной компоненты в сторону Таймыра почти на 1400 км со смещением к западу на 200 км (в направлении сдвига максимума Z -компоненты Сибирской магнитной аномалии). Перемещение области минимума полных значений H -компоненты (для значений $H \leq 1000$ нТл) за период с 1957 г. по 2023 гг. показано (рис. 3).

Анализ динамики овала полярных сияний в период с 1957 по 2023 гг. показал, что границы овала определялись силовыми линиями значений H - и Z -компонент магнитного поля авроральной зоны. При этом траектория эволюции H -компоненты коллинеарна смещению кромок северного аврорального овала.

В спокойных условиях на высоте 110 км овал полярных сияний располагался внутри минимума H -компоненты магнитного поля авроральной зоны между граничными значениями с изолиниями полных значений от $H_s = 4500$ –5000 нТл до 8000 нТл (рис. 3). В магнитоспокойные дни 1957 г. и 2014 г. экваториальные границы овалов сияний находились в минимуме H -компоненты между изолиниями $H_s = 8000$ нТл в районе Канады и $H_s = 4500$ нТл в районе Сибири. В спокойных условиях 2023 г. овал размещался между изолиниями $H_s = 4500$ нТл в районе Канады и $H_s = 8000$ нТл в Сибири (рис. 3).

В возмущенных условиях на высоте 200 км овал полярных сияний тоже располагался внутри минимума овала H -компоненты МПЗ, но в интервале между изолиниями полных значений H_s от 8000 до 13000 нТл (рис. 5). Например, в возмущенных условиях 2015 г. в районах Канады и Сибири экваториальные границы овала приурочены к изолинии H -компоненты $H_s = 8000$ нТл. В возмущенных условиях 2017 и 2023 гг. экваториальная граница овала достигала изолинию $H_s = 9000$ –10000 нТл в районе Канады и $H_s = 13000$ нТл на экваториальной кромке овала в районе Сибири.

Анализ овалов полярного сияния в разные периоды геомагнитной активности показал изменение границ овала в зависимости от уровня магнитной активности (рис. 5). В работе [Пудовкин и др. 1977] высказано предположение, что эква-

ториальная граница возмущенной зоны овала эквивалентна по своей физической природе кромке спокойного овала. Овал полярных сияний расширяется и смещается к югу так, что его южная граница опускается до $\sim 60^\circ$ N во время сильных возмущений; в отдельных случаях сияния могут появляться на 50° N и даже на 30° N. При этом ширина овала вдоль полуночного меридиана может увеличиваться от 5000 км в магнитоспокойные дни до 7000 км и более – в возмущенные. Например, ширина овала в спокойных условиях 2023 г. ($K_p = 3$) составила 5000 км, и он находился между широтой 68° N в районе Канады и широтой 65° N в Сибири. В возмущенных условиях 2023 г. ($K_p = 7$) ширина овала составила 7200 км, и он расположился между широтой 55° N в районе Канады и широтой 58° N в Сибири (рис. 5). Расстояние между экваториальными кромками овалов в Сибири в спокойных и возмущенных условиях 2023 ($K_p = 7$) и 2023 ($K_p = 3$) составило 850 км.

Овалы в магнитоспокойные дни 1957 г. [Хорошева, 1967], 1970 г. [Старков, 1973] и 2023 г. по модели OVATION (<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>) приведены на рис. 3. При совмещении овалов 1970 г. и 2023 г. видно, что экваториальная кромка овала 1970 г. в районе Сибири доходит до широты 76° N, а в 2023 г. опустилась до широты 65° N, т.е. смещение овалов в магнитоспокойные дни визуальное полученное по методике [Старков, 1973] и прогноза по модели OVATION составило 11 градусов (рис. 3д).

Для решения вопроса изменения местоположения северного аврорального овала авторы рассматривают исключительно магнитоспокойные дни. Для примера построены овалы разных лет в зимние периоды магнитоспокойных дней по текущим прогнозам модели OVATION на 18 часов мирового времени UT в географической системе координат (рис. 6). Экваториальные границы за 8 лет с 2014 по 2022 гг. по прогнозам модели OVATION сместились на 700 км (6 градусов) (рис. 6в) коллинеарно смещению горизонтальной компоненты, которое составило 350 км (~ 3 градуса) (рис. 6г). За этот период геомагнитный полюс продвинулся на 40 км (~ 0.5 градуса), однако направление его движения составляет угол $\sim 30^\circ$ с направлением смещения овалов по прогнозам модели OVATION (рис. 6г).

Овалы полярных сияний в возмущенные дни приведены на рис. 5. На рис. 5а видно, что в 2015 г. при $K_p = 9$ экваториальная кромка в районе Евразии не доходила до широты $\sim 60^\circ$ N. В 2023 г. при $K_p = 7$ (рис. 5в) южный край в районе Сибири опустился до широты 57° N.

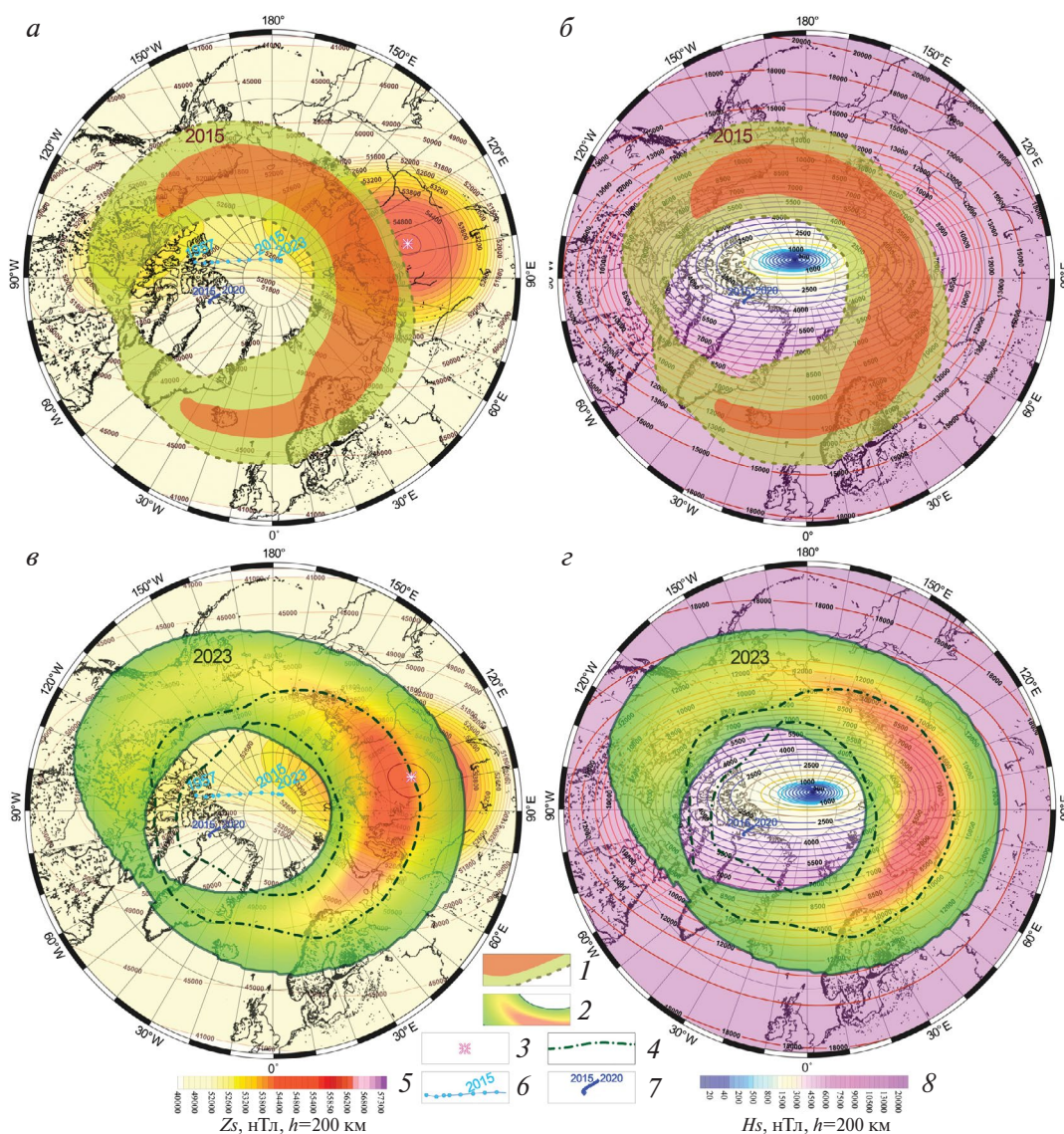


Рис. 5. Положение овала полярного сияния в периоды разной геомагнитной активности.

(а, б) – Z - и H -компоненты МПЗ 2015 г.; (в, г) – Z и H 2023 г. Овалы в возмущенный день: 1 – 17.03.2015 ($K_p = 9$); 2 – 23.03.2023 ($K_p = 7$); 3 – зона максимумов Z ; 4 – Z авроральной зоны (высота 200 км); 5 – овал в спокойный день 17.01.2023 ($K_p = 3$); 6 – перемещение МП с 1957 по 2023 гг. (высота 200 км); 7 – перемещение геомагнитного полюса 1900–2025 гг.; 8 – H -авроральной зоны (высота 200 км).

Анализ максимумов полных значений Z -компоненты и положений границ овала полярного сияния с 1957 по 2023 гг. показал следующее. В северном полушарии в спокойных условиях на высоте 110 км границы овала сияния в районах мировых магнитных аномалий и в Канаде, и в Сибири ограничены областями максимумов полных значений Z -компоненты (рис. 3). В возмущенных условиях на высоте 200 км границы овала доходили как до областей максимумов, так и распространялись за центры максимумов Z -компонен-

ты. Однако при этом границы внутренних зон энергичных частей овала совпадали с положением границ в спокойные дни (рис. 5), что подтверждает выводы, сделанные в работе [Пудовкин и др., 1977].

В спокойных условиях 1957 г. экваториальная кромка овала в районе магнитной аномалии Канады достигла максимума полных значений Z -компоненты $Z_s = 57000$ нТл, а в Сибири – максимума Z_s магнитной аномалии по изолинии $Z_s = 56000$ нТл (рис. 3а).

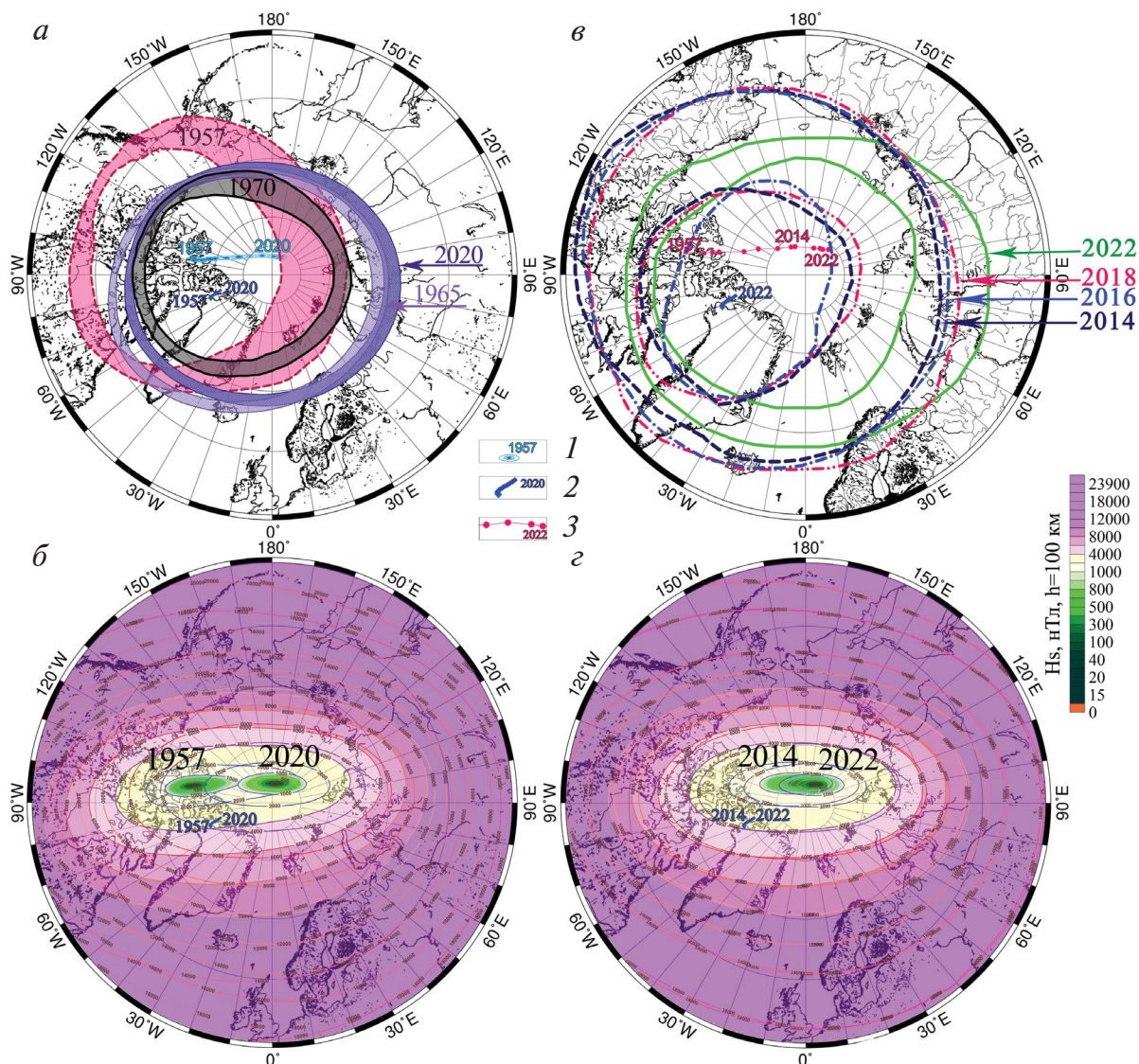


Рис. 6. Авроральная зона северного полушария: (а) — северный авроральный овал в зимние периоды разных лет: овал 1957 г., овал 1970 г., модельные овалы 1965 и 2020 гг., (б) — границы северных авроральных овалов по текущим прогнозам модели OVATION в магнитоспокойные дни 2014, 2016, 2018, 2020 гг. Эволюция H -компоненты магнитного поля авроральной зоны (высота 100 км): (в) — за период с 1957 по 2020 гг., (г) — за период с 2014 по 2022 гг. 1 — перемещение H -компоненты с 1957 по 2023 г. на высоте 100 км; 2 — перемещение геомагнитного полюса (1900–2023 гг.); 3 — перемещение МП на приземной высоте (1957 по 2023 г.).

В возмущенных условиях 2015 г. и 2023 г. овалы в Сибири проходили через максимумы Z_s и достигали изолиний $Z_s = 55000$ нТл и $Z_s = 57500$ нТл (рис. 5).

Анализ траектории продвижения минимумов полных значений H -компоненты и максимумов полных значений Z -компоненты на высоте овала полярных сияний позволил сравнить особенности перемещения овала полярного сияния за период с 1957 по 2023 гг.

В результате совместного мониторинга эволюции H - и Z -компонент и местоположения овалов выявлено положение северного овала полярных сияний по прогнозу модели OVATION в топологическом пространстве постоянного магнитного поля Арктики.

Это позволяет использовать овал полярных сияний в качестве индикатора оценки местоположения овала неоднородностей ПЭС, что дает возможность повысить точность позициониро-

вания с помощью навигационных систем GPS/ГЛОНАСС в высокоширотных областях.

3. ВЫВОДЫ

1. На основе векторной модели постоянного МПЗ (СПбФ ИЗМИРАН) построена магнитная модель компонент северной авроральной зоны за период с 1900 по 2023 гг. для высот от 0 до 1000 км. Это позволило получить представление об эволюции магнитного поля околоземного космического пространства авроральной зоны в Арктике. Особенности H -компоненты магнитного поля авроральной зоны и максимумов Z -компоненты помогли выявить тенденцию изменений интенсивности и местоположения Канадской и Сибирской мировых магнитных аномалий.

2. Проведен мониторинг перемещения H -компоненты и смещения максимумов полных значений Z -компоненты Канадской и Сибирской магнитных аномалий на высотах северного аврорального овала в период с 1957 по 2023 гг.

3. В результате анализа эволюции овала с 1957 по 2023 гг. получена оценка местоположений овала полярных сияний в топологическом пространстве постоянного геомагнитного поля авроральной зоны Арктики.

4. Исследован характер пространственного перемещения северного овала полярных сияний и эволюции компонент магнитного поля авроральной зоны. Выявлено, что сонаправленность движения овала существенна только для H - и Z -компонент поля. Анализ показал, что смещение аврорального овала в период 1957–2023 гг. произошло сонаправленно перемещению H -компоненты и изменению Z -компоненты магнитного поля. Северный авроральный овал перемещается от Канадской магнитной аномалии в сторону Сибирской магнитной аномалии на фоне наблюдаемой эволюции H - и Z -компонент. Овал продвинулся от района Канады на 1400 км по направлению траектории движения H -компоненты со смещением к западу на 200 км коллинеарно сдвигу максимума Z -компоненты Сибирской магнитной аномалии.

5. Оценка современного положения аврорального овала создает возможность его практического использования в настоящее время. Определение местоположения овала полярных сияний имеет важное прикладное значение, так как сходство динамики структуры северного аврорального овала и возмущений неоднородностей полярной ионосферы, влияющих на распространение сигналов навигационных спутников, дает возможность осуществлять прогноз состояния

ионосферы и условий приема GPS/ГЛОНАСС сигналов, что сможет повысить точность позиционирования в Арктическом регионе.

6. Исследование эволюции перемещения H - и Z -компонент магнитного поля авроральной зоны околоземного пространства и северного овала полярных сияний имеет научное, практическое и прикладное значение для решения вопросов аэрокосмической навигации и позиционирования в высокоширотных регионах, а также способствовать своевременной разработке эффективных стратегий смягчения последствий космической погоды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 16.5. “Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей” и государственной программы РФ “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации” (Указ Президента РФ от 05.03.20 г. № 164).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В., Джин Я. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 6. С. 769–782. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020060152>
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. Т. 9. № 2. С. 88–106. 2016.
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 / Труды XV Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. СПб, 21–25 сентября 2020 г. С. 288–291. 2020.
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Алексеев В.Ф. и др. Применение высотных моделей магнитного поля Земли для решения геофизических задач // Космич. исслед. Т. 57. № 3. С. 185–191. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0010952519030067>
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Гурьев И.С., Лабеецкий П.В., Латышева О.В. Анализ информативности магнитного поля земли в околоземном космическом пространстве // Космич. исслед. Т. 59. № 3. С. 177–190. 2021. <https://doi.org/10.1134/S0010952521030059>
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Латышева О.В. Магнитные аномалии литосферы в околоземном космическом пространстве / Материалы научной конференции “Магнетизм на Земле и в космосе”. М., 15–16 мая 2019 г. ИЗМИРАН. С. 91–95. 2019а. <https://doi.org/10.31361/pushkov2019.021>

- 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. Т. 37. № 4. С. 171–182. 2021. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2021-37-4-171-182>
- Петрова А.А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля / Сб. трудов “Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли”. Ред. В.Д. Кузнецов. Москва: изд-во ИЗМИРАН. С. 412–423. 2015.
- Петрова А.А., Латышева О.В. Верификация модели аномалий компонент магнитного поля Арктики / Материалы Всероссийской конференции: Глобальные проблемы Арктики и Антарктики. Архангельск, 2–5 ноября 2020 г. Отв. ред. акад. РАН А.О. Глико, акад. РАН А.А. Барях, чл.-корр. РАН К.В. Лобанов, чл.-корр. РАН И.Н. Болотов. ФИЦКИА УрО РАН. С. 279–284. 2020.
- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А. Глубинное строение Арктики и Антарктики по магнитным аномалиям компонент и аномалиям силы тяжести // Космич. исслед. Т. 60. № 4. С. 331–347. 2022.
- Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, 312 с. 1977.
- Пудовкин М.И., Семенов В.С. Теория пересоединения и взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли. М.: Наука, 126 с. 1985.
- Старков Г.В. Синоптические карты овала полярных сияний в разные моменты мирового времени / Авроральные явления 70-I: материалы наблюдений Полярного геофизического института за первое полугодие 1970 г. Акад. Наук СССР, Кольский фил-л им. С.М. Кирова. Отв. ред. Брюнелли. Апатиты: Кольский филиал АН СССР. 156 с. 1973.
- Трошичев О.А. Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах. Л.: Гидрометеиздат, 256 с. 1986.
- Системный мониторинг ионосферы. Сборник научных трудов под ред. Н.Г. Котонаевой. М.: Физматлит, 416 с. 2019.
- Филатов М.В., Швеиц М.В., Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Черноус С.А. Полярные сияния как индикатор устойчивости сигнала GPS-приемника // Труды Кольского научного центра РАН. № 6 (32). С. 93–100. 2015.
- Филатов М.В., Черноус С.А. Опыт тестирования модели овала полярных сияний NORUSCA // Труды Кольского научного центра РАН. № 7–3 (8). С. 38–46. 2017.
- Хорошева О.Б. Пространственно-временное распределение полярных сияний и их связь с высокоширотными геомагнитными возмущениями // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1. С. 695–701.
- Хорошева О.Б. Пространственно-временное распределение полярных сияний. М.: Наука, 82 с. 1967.
- Черноус С.А., Алпатов В.В., Будников П.А., Филатов М.В. Сопоставление положения аврорального овала и пространственно-временного распределения индекса флуктуаций ПЭС по данным сети станций радиотомографии ионосферы // Труды Кольского научного центра РАН. № 5–4 (9). С. 108–116. 2018.
- Черноус С.А., Филатов М.В., Шагмуратов И.И., Ефишов И.И. Дискретные полярные сияния на Шпицбергене как индикатор влияния состояния полярной ионосферы на навигационные сигналы // Вестн. КНЦ РАН. № 3 (10). С. 106–114. 2018а.
- Черноус С.А., Шагмуратов И.И., Иевенко И.Б., Филатов М.В., Ефишов И.И., Швеиц М.В., Калитенков Н.В. Авроральные возмущения как индикатор воздействия ионосферы на навигационные сигналы // Химическая физика. Т. 37. № 5. С. 77–83. 2018б. <https://doi.org/10.7868/S0207401X18050102>.
- Черноус С.А., Шагмуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. Сравнение пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС и модельного аврорального овала / Proc. XLI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity, 12 – 16 March 2018. P. 160–163. 2018в. <https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.160-163>.
- Черноус С.А., Шагмуратов И.И., Вульфович Б.А., Калитенков Н.В. Навигация GPS/ГЛОНАСС в Арктике и полярные сияния // Вестн. МГТУ. Т. 19. № 4. С. 806–812. 2016. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-4-806-812>.
- Шагмуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И., Захаренкова И.Е., Тепеницына Н.Ю. Флуктуации полного электронного содержания и ошибки GPS позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 года // Известия РАН. Сер. физическая. Т. 85. № 3. С. 433–439. 2021. <https://doi.org/10.3103/S1062873821030230>
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., and M. Nosé Special issue “International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation” // Earth, Planets and Space. V. 74. A11. 2022. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01569-z>
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D. et al. Earth. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Planets and Space. V. 73. A49. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms super-storms and their impact on GPS-based navigation // Space Weather. V. 12. № 7. P. 508–525. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
- Aurora - 30 minute forecast/ OVATION-Prime Model. Current Space Weather Conditions on NOAA Scales. <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>
- Brown W., Beggan C., Cox G., and Macmillan S. The new WMM2020 and IGRF-13 models and a retrospective analysis of IGRF secular variation / EGU General Assembly 2020. Online. 4–8 May 2020. EGU2020-9775. 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9775>
- Breedveld M. J. Predicting the Auroral Oval Boundaries by Means of Polar Operational Environmental Satellite

- Particle Precipitation Data. Master's Thesis in Space Physics, FYS-3931. UiT The Arctic University of Norway. 121 p. 2020.
- Chernous S., Budnikov P., Shagimuratov I., Alpatov V., Filatov M., Efshov I., Tepenitsina N. Variations of GNSS signals in Euro-Arctic region during auroral Activity / 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods. Kiruna, 27–31 August 2018. P. 10. 2018.
- Case N.A., MacDonald E.A., and Viereck R. Using citizen science reports to define the equatorial extent of auroral visibility // *Space Weather*. V. 14. № 3. P. 198–209. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015SW001320>
- Feldstein Y.I., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // *Planetary and Space Science*. V. 15. № 2. P. 209–229. 1967.
- Kalb V., Kosar B., Collado-Vega Y., Davidson C. Aurora detection from nighttime lights for Earth and Space Science applications // *Earth and Space Science*. V. 10. e2022EA002513. 2023.
- Kopytenko Yu.A., Chernouss S., Petrova A.A., Filatov M.V., Petrishchev M.S. The Study of Auroral Oval Position Changes in Terms of Moving of the Earth Magnetic Pole / *Problems of Geocosmos—2018*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. P. 289–297. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_25
- Longcope D.W. Topological Methods for the Analysis of Solar Magnetic Fields // *Living Rev. Solar Physics*. V. 2. A7. 2005. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2005-7>
- Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., Viereck R.A., Newell P.T. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae // *Space Weather*. V. 10. № 3. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011SW000746>
- Maffei S., Eggington J.W.B., Livermore P.W. et al. Climatological predictions of the auroral zone locations driven by moderate and severe space weather events // *Scientific Reports*. V. 13. A779. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25704-2>
- Marchaudon A., Owen C.J., Bosqued J.-M. et al. Simultaneous. Double Star and Cluster FTEs observations on the dawnside flank of the magnetosphere // *Ann. Geophys.* V. 23. № 8. P. 2877–2887. 2005. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-2877-2005>
- Mooney M.K., Marsh M.S., Forsyth C., et al. Evaluating auroral forecasts against satellite observations // *Space Weather*. V. 19. e2020SW002688. 2021. <https://doi.org/10.1029/2020SW002688>
- Newell P.T., Sotirelis T., and Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget // *J. Geophys. Res.* V. 114. A09207. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014326>
- Newell P., Liou Kan, Zhang Yuchao, Sotirelis T., Paxton Larry, Mitchell E. OVATION Prime-2013: Extension of Auroral Precipitation Model to Higher Disturbance Levels // *Space Weather*. V. 12. P. 368–379. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014SW001056>
- Olsen N., Pauluhn A. Exploring Earth's magnetic field — Three make a Swarm // *Spatium*. V. 43. P. 3–15. 2019.
- Oguti T. Prediction of the Location and Form of the Auroral Zone: Wandering of the Auroral Zone out of High Latitudes // *Journal of Geophysical Research*. V. 98. № A7. P. 11649–11655. 1993.
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I. Verification of the Arctic Magnetic Field Component Model Based on Observations on the CHAMP and Swarm Satellites // *Problems of Geocosmos—2020*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham, P. 53–63. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_5
- Petrukovich A.A., Mogilevsky M.M., Chernyshov A.A., and Shklyar D.R. Some aspects of magnetosphere–ionosphere relations // *Physics-Uspekhi*. V. 58. № 6. P. 606–611. 2015. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0185.201506i.0649>
- Sabaka T.J., Clausen L.T., Olsen N., Finlay C.C. A comprehensive model of Earth's magnetic field determined from 4 years of Swarm satellite observations // *Earth, Planets and Space*. V. 70. № 130. P. 1–26. 2018. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0896-3>
- Sigernes F., Dyrland M., Brekke P., Gjengedal E.K., Chernouss S., Lorentzen D.A., Oksavik K., Deehr C.S. Oval Real-Time Prediction —SvalTrackII // *Optica Pura y Aplicada*. V. 44. № 4. P. 599–603. 2011.
- Sigernes F., Ivanov Yu., Chernouss S. et al. Hyperspectral all-sky imaging of auroras // *Optics Express*. V. 20. № 25. P. 27650–27660. 2012. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027650>
- Thébault E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G. A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // *Earth, Planets and Space*. V. 68. A126. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5>
- Tsyganenko N.A. Secular Drift of the Auroral Ovals: How Fast Do They Actually Move? // *Geophysical Research Letters*. V. 46. № 6. P. 3017–3023. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL082159>
- Zhang Binzheng, Delamere Peter A., Zhonghua Yao et al. How Jupiter's unusual magnetospheric topology structures its aurora // *Science Advances*. V. 7. № 15. 2021. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1204>

Evolution of the Northern Auroral Oval in the Light of Modern Changes in The Earth's Magnetic Field

A. A. Petrova^{1, *}, O. V. Latysheva^{1, **}

¹Saint Petersburg Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

**e-mail: aa_petrova@inbox.ru*

***e-mail: l-olli@yandex.ru*

The active development of the Arctic, the increase in the intensity of navigation along the Northern Sea Route and the increase in the intensity of airlines in the airspace of the Arctic Ocean draws attention to the problem of violations of the transpolar propagation of radio waves. In high-latitude regions, the passage of navigation signals from global positioning systems depends on the state of the ionosphere. During geomagnetic disturbances, ionospheric inhomogeneities develop, leading to interference with satellite positioning systems. The position and shape of the auroras depend on the state of the magnetosphere. In the process of work, for the first time, a component model of the magnetic field of the auroral zone was calculated based on an updated digital model of the full values of the components of the Earth's magnetic field of the SPbF IZMIRAN. The magnetic field of the auroral zone is calculated for altitudes from 0 to 1000 km for the period from 1900 to 2023, including for heights of 100-110 km, where the intensity of the aurora reaches its maximum in the near-Earth space of the Arctic. The spatial displacement of the auroral oval has been estimated for the period from 1957 (its first mathematical description) to the present. The analysis showed, that the displacement of the auroral oval boundaries during the considered period occurred in time and space co-directionally with the movement of the extremum isolines of the horizontal and vertical components of the auroral zone magnetic field of the northern hemisphere.

Keywords: Aurora Borealis oval, permanent magnetic field of the Arctic auroral zone.