

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ «СПбФ ИЗМИРАН» ЭПОХИ 2025 г. И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

© 2026 А.А. Петрова, О.В. Латышева

*СПбФ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия, 199034;
e-mail: aa_petrova@inbox.ru*

Поступила в редакцию 30.05.2025; после доработки 09.04.2026; принята в печать 27.06.2026

Представлена мировая пространственная модель абсолютных значений компонент магнитного поля Земли «СПбФ ИЗМИРАН» на эпоху 2025 г. Модель создана на основе обновляемой векторной магнитометрической базы данных с уровнем относимости IGRF-14. Цифровая гибридная сеточная модель верифицирована векторными измерениями в геомагнитных обсерваториях Мировой сети, на уровнях аэро- и гидромагнитных съемок и высотах полета спутников CHAMP и Swarm. Компонентные модели авроральных зон северной и южной полярных областей построены для высот 0–1000 км. Исследована динамика изменений компонент магнитного поля, эволюция положений овалов полярных сияний и ионосферных неоднородностей, влияющих на качество радиосвязи в высокоширотных областях. Модель компонент высокого разрешения «СПбФ ИЗМИРАН» используется в морской, воздушной и аэрокосмической навигации, востребована для изучения строения земной коры и поиска полезных ископаемых.

Ключевые слова: магнитная компонентная модель, модели авроральных зон, геонавигация.

ВВЕДЕНИЕ

С 1932 г. Институт Земного магнетизма (НИИЗМ, в дальнейшем — ЛОИЗМИРАН, СПбФ ИЗМИРАН) занимался исследованием пространственного распределения элементов магнитного поля Земли (МПЗ) и его вековых вариаций на территории СССР и акватории Мирового океана. С 1937 г. на основе данных компонентной наземной генеральной магнитной съемки, проводимой в Институте земного магнетизма, строились и издавались магнитные карты элементов МПЗ (Колесова, 1986; Петрова, 2015; Почтарев, 1984). С 1965 г. регулярно издавались Мировые магнитные карты элементов МПЗ для Мирового океана и земного шара по данным генеральных съемок и векторных измерений элементов МПЗ, выполненных маломагнитной шхуной «Заря», (Баткова и др. 2007; Карасик и др., 1986; Колесова, 1986; Копытенко, Петрова, 2016; Петрова, 2015; Почтарев, 1984). В результате обобщения компонентных измерений в СПбФ ИЗМИРАН была создана цифровая магнитоме-

трическая база данных приземных векторных измерений элементов земного магнетизма (Копытенко, Петрова, 2016; Петрова, 2015).

С целью повышения детальности карт северной (X), восточной (Y), горизонтальной (H) и вертикальной (Z) компонент, магнитного склонения (D) и наклона (I) вектора индукции МПЗ разработана оригинальная методика составления расчетных карт компонент, вычисляемых по модульной информации. Основные положения методики изложены в публикациях, монографиях и свидетельствах об изобретении. (Колесова, 1986; Колесова и др., 1984; Колесова, Черкаева, 1986; Почтарев, 1984). Методика основана на исследовании энергетического спектра и спектрально-пространственных характеристик аномалий МПЗ (Петрова, 1977; Petrova, Kolesova, 1981). Это позволило увеличить картографированность поверхности земного шара компонентными данными МПЗ и повысить детальность карт Мирового океана, в том числе магнитного склонения (Копытенко, Петрова, 2014; Щербаков и др., 2017). СПбФ ИЗМИРАН располагает

приземной обновляемой базой векторных данных МПЗ по земному шару.

В связи с широким развитием телеметрии при выполнении буровых работ стало актуальным создание локальных глубинных моделей компонент магнитного поля Земли для решения задач навигации наклонно-направленного бурения нефтяных скважин. Для геонавигации разрабатываемых месторождений строятся локальные глубинные модели абсолютных значений элементов МПЗ в виде трехмерных геомагнитных кубов. Это позволяет рассчитывать значения модуля и компонент МПЗ на эксплуатационные глубины и временные интервалы прогнозирования траекторий наклонно-направленного бурения. В настоящее время зарубежные Мировые магнитные модели высокого разрешения (BGGM — поддерживается Британской геологической службой; — HDGM — разработана Национальным центром экологической информации США) в России официально недоступны. В связи с этим возросла актуальность применения отечественных магнитных моделей подобного класса. Компонентная модель высокого разрешения СПбФ ИЗМИРАН применяется для геонавигации, определения траекторий и проводки нефтяных скважин (Бухтояров и др. 2024, 2025).

Для эпохи 2025–2030 гг. в СПбФ ИЗМИРАН разработана пространственная цифровая гибридная сеточная модель абсолютных значений северной (X), восточной (Y), горизонтальной (H) и вертикальной (Z) компонент МПЗ, магнитного склонения (D) и наклонения (I) на основе магнитометрической базы, актуализируемой по результатам наземных, морских и аэромагнитных съемок.

Модель используется для осуществления научной деятельности по направлениям: магнетизм Земли и планет, ионосфера, включая геофизику и научные направления в смежных областях, в том числе при решении геолого-геофизических задач поиска месторождений рудных полезных ископаемых и углеводородов.

Мировые магнитные карты компонент СПбФ ИЗМИРАН предназначены для обеспечения нужд Военно-морского флота в морской навигации, а также в интересах решения задач воздушной навигации авиацией Военно-морского флота и Военно-космических сил РФ.

На базе пространственной модели СПбФ ИЗМИРАН в рамках выполнения государственной «Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021–2030 годы)» созданы компонентные модели авроральных зон северной и южной полярных областей Земли для высот 0–1000 км.

В настоящей работе представлены результаты применения пространственной модели

компонент МПЗ СПбФ ИЗМИРАН и рассмотрены перспективы ее использования для решения фундаментальных и прикладных задач. Магнитные карты компонент используются для морской, воздушной и аэрокосмической навигации, для изучения строения земной коры и поиска полезных ископаемых и для геонавигации скважин (Бухтояров и др. 2024, 2025; Копытенко, Петрова, 2016, 2019, 2020; Латышева, Петрова, 2025; Наливкина, Петрова, 2018; Петрова, Колесова, 1986; Петрова, Копытенко, 2019; Петрова, Латышева, 2025; Kopytenko et al., 2019b, 2021; Petrova et al., 2019, 2022a).

МИРОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ КОМПОНЕНТ МПЗ СПбФ ИЗМИРАН ЭПОХИ 2025 г.

СПбФ ИЗМИРАН традиционно занимается исследованием пространственного распределения элементов земного магнетизма и его вековых вариаций (Карасик и др., 1986; Колесова, 1986; Копытенко, Петрова, 2014, 2016, 2020; Петрова, 2015; Почтарев, 1984; Petrova et al., 2011). Векторные измерения элементов МПЗ в акватории Мирового океана проводились по регулярной сети на маломанитном научно исследовательском судне (НИС) «Заря», аэромагнитные съемки по региональным протяженным профилям выполнялись на территории СССР. По результатам векторных измерений элементов МПЗ на подвижных носителях и данным наземной генеральной съемки была сформирована собственная магнитометрическая база данных компонент МПЗ. С 1965 г. в СПбФ ИЗМИРАН строились и издавались Мировые магнитные карты в масштабах 1:2 500 000, 1:10 000 000 и 1:50 000 000. Карты магнитного склонения Мирового океана опубликованы на эпохи 1955, 1965, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 гг. и были обязательны к применению в морской и воздушной навигации для обеспечения Военно-морского флота данными о земном магнетизме (Колесова, 1986; Копытенко, Петрова, 2016, 2020; Петрова, 2015; Почтарев, 1984).

Наиболее распространенным видом магнитометрических измерений при гидро- и аэромагнитных съемках являются измерения модуля вектора магнитной индукции МПЗ, что обусловлено относительной конструктивной простотой модульных магнитометров. Но поскольку МПЗ является векторным, то использование только модульной информации существенно обедняет возможности применения магнитометрических данных при решении навигационных и прикладных задач. Это касается вопросов структурного тектонического районирования, региональных геолого-геофизических исследований характера

намагниченности источников магнитных аномалий, палеомагнитных реконструкций, что позволяет подойти к решению вопроса о намагниченности источников региональных и крупных региональных аномалий, несущих информацию о физическом состоянии древней континентальной и молодой коры линейных аномалий срединно-океанических хребтов.

С целью повышения картографированности земного шара компонентами МПЗ была разработана методика построения расчетных карт компонент на основе модульной информации (Колесова, 1986; Колесова, Черкаева, 1986; Почтарев, 1984). В результате применения этой методики создавалась единая магнитометрическая база измеренных и расчетных значений компонент МПЗ (Колесова, 1986; Копытенко, Петрова, 2016, 2020; Петрова, 2015). На основе обновляемой и пополняемой магнитометрической базы измеренных и расчетных значений на эпоху 2015 г. впервые была создана цифровая модель компонент МПЗ СПбФ ИЗМИРАН для земного шара с пространственным разрешением 0.025° по широте и долготе (Петрова, 2015), которая включала в себя аномалий, создаваемые источниками в земной коре. Цифровая модель позволила повысить детальность карт магнитного склонения D Мирового океана, а также увеличить картографированность земного шара компонентами МПЗ (D, I, X, Y, H, Z) более чем на 90 % (Копытенко, Петрова, 2020). Высокое качество карт D и компонент МПЗ подтверждено успешным использованием их в магнитной навигации (Щербаков и др., 2017).

В настоящей работе представлена мировая пространственная цифровая модель абсолютных значений компонент магнитного поля Земли на эпоху 2025 г., актуализированная по результатам наземных, морских и аэромагнитных съемок. Компонентная модель МПЗ на эпоху 2025 г. представляет собой суперпозицию элементов главного поля в виде уровня относимости по модели IGRF-14 (International..., 2024) и магнитных аномалий компонент земной коры, которые сформированы по данным магнитометрической базы СПбФ ИЗМИРАН, содержащей как измеренные, так и расчетные значения. Изменения абсолютных значений компонент МПЗ во времени учитываются по модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field).

Пространственная модель компонент СПбФ ИЗМИРАН позволила создавать новое поколение магнитных карт компонент D, I, H, Z, X, Y для Мирового океана и околоземного пространства в диапазоне высот от 0 до 1000 км, которые востребованы для решения вопросов морской, воздушной и аэрокосмической магнитной навигации на подвижных объектах. Карты компонент

МПЗ рассчитываются на задаваемые высоты и периоды работы движущихся носителей (Копытенко, Петрова, 2016, 2019, 2020; Копытенко и др., 2019; Koryutenko et al., 2019b, 2021). Мировые карты D, H и Z компонент МПЗ СПбФ ИЗМИРАН на эпоху 2025 г. представлены для земного шара на уровне океана (рис. 1).

В настоящей статье карты абсолютных значений компонент магнитного поля авроральных зон северной и южной полярных областей Земли для уровня океана приведены в универсальной полярной стереографической проекции (рис. 2). На основе пространственной модели МПЗ СПбФ ИЗМИРАН созданы цифровые компонентные модели авроральных зон в диапазоне высот от 0 до 1000 км (Petrova, Latysheva, 2024). По компонентной модели авторами вычислены элементы МПЗ от поверхности Земли до ионосферных слоев на высоте 1000 км, что имеет научное и прикладное значение для аэрокосмической магнитной навигации и решения геолого-геофизических задач в сложных условиях малодоступных и слабо изведанных районов полярных областей Земли (Копытенко, Петрова, 2016, 2019, 2020; Копытенко и др., 2019; Koryutenko et al., 2019b, 2021).

Верификация магнитной модели компонент МПЗ СПбФ ИЗМИРАН выполнена по результатам сравнения значений модели с векторными измерениями на земной поверхности и на разных высотных уровнях. Вблизи земной поверхности проведены сопоставления модели с абсолютными значениями элементов геомагнитного поля по стандартам международной системы INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) (INTERMAGNET, 2024), полученными в геомагнитных обсерваториях Мировой сети (Копытенко, Петрова, 2016), и с данными векторных аэро- и гидромагнитных съемок (Копытенко и др. 1998; Petrova et al., 2022b).

Оценка погрешности расхождения компонентной модели с данными 267 геомагнитных обсерваторий Мировой сети выполнена статистическими методами. Анализ показал, что среднеквадратическая погрешность расхождений по модулю и X, Y, Z-компонентам составляет ± 30 нТл, по D и I — $\pm(0.1-0.2)^\circ$ (Копытенко, Петрова, 2016).

При сопоставлении расчетов компонентной модели с данными гидромагнитных векторных съемок среднеквадратическая погрешность расхождений составила $\pm(25-30)$ нТл. На высотах аэромагнитных съемок России и Скандинавии среднеквадратическая погрешность расхождений векторных измерений с моделью составила $\pm(5-15)$ нТл.

Сравнение с результатами спутниковых компонентных и модульных измерений

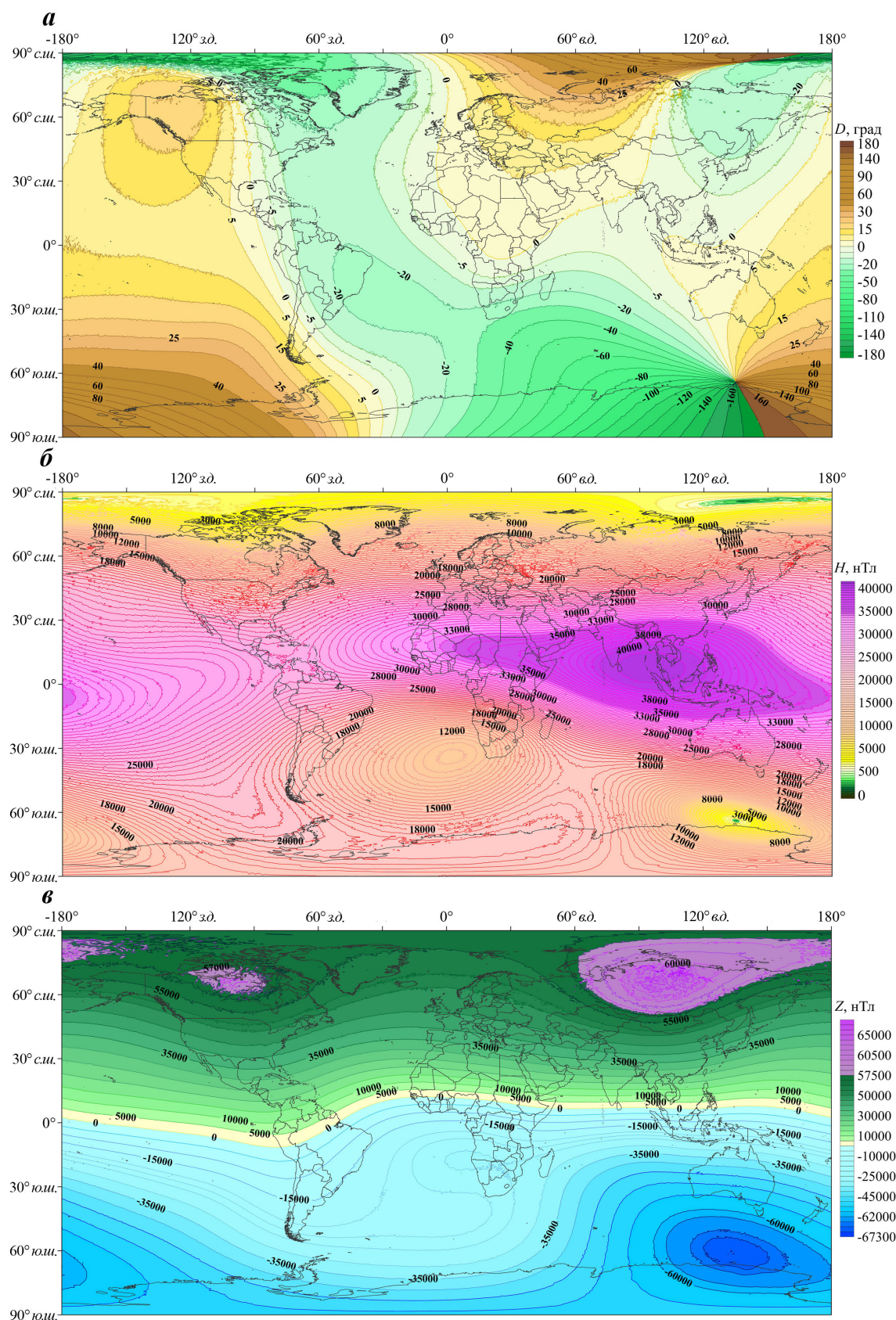


Рис. 1. Мировые карты абсолютных значений элементов магнитного поля Земли для уровня океана на эпоху 2025 г. по модели СПбФ ИЗМИРАН: *a* — магнитное склонение D ; *б* — горизонтальная компонента H ; *в* — вертикальная компонента Z .

Fig. 1. World maps of absolute values of the Earth's magnetic field elements for sea level for the 2025 epoch according to the SPbF IZMIRAN model: *a* — magnetic declination D ; *б* — horizontal component H ; *в* — vertical component Z .

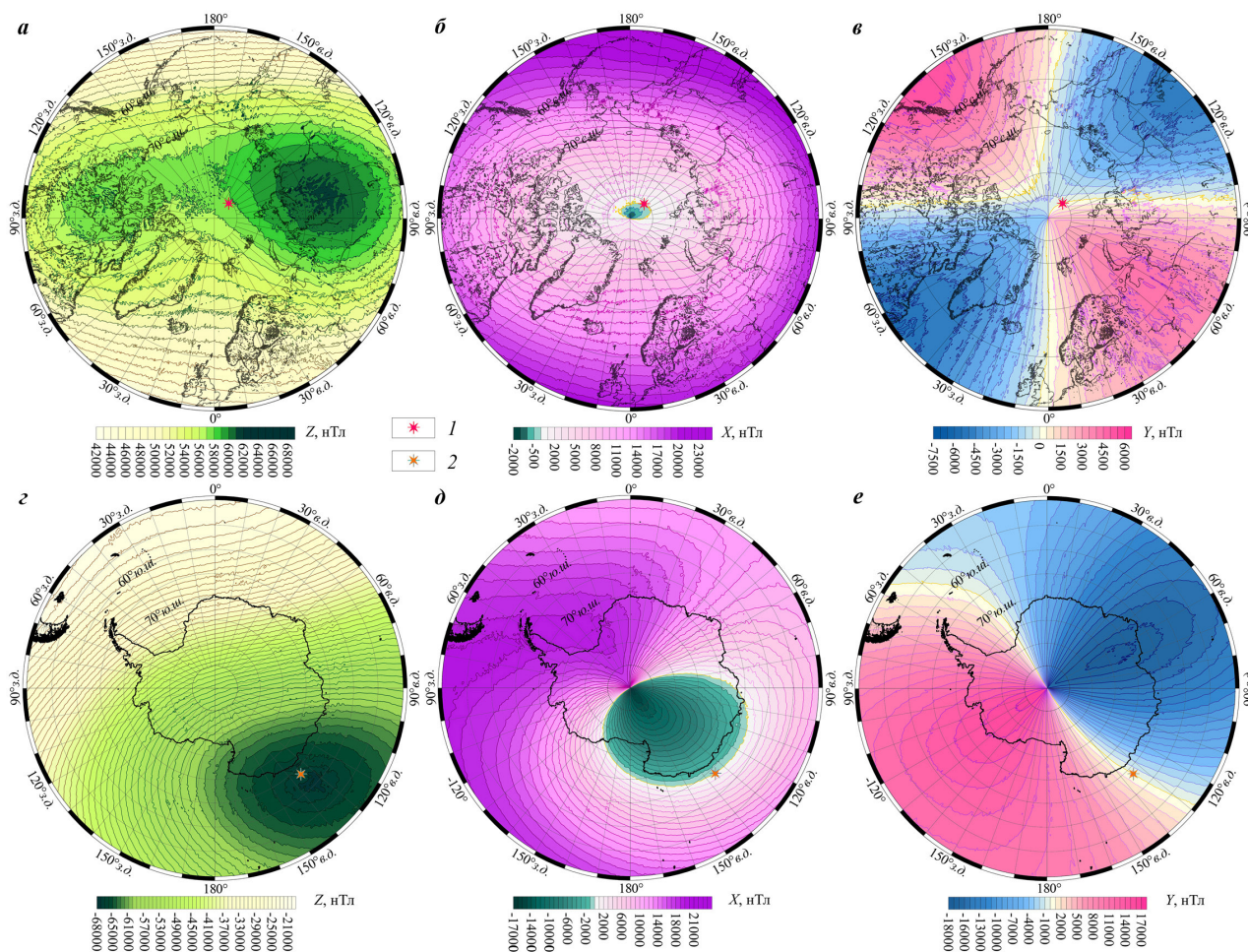


Рис. 2. Карты абсолютных значений компонент магнитного поля Земли полярных шапок для уровня океана на эпоху 2025 г. (модель СПбФ ИЗМИРАН). Северная полярная шапка: *a* — вертикальная компонента *Z*; *b* — северная компонента *X*; *в* — восточная компонента *Y*; Южная полярная шапка: *г* — вертикальная компонента *Z*; *д* — северная компонента *X*; *е* — восточная компонента *Y*. 1 — положение магнитного полюса в северном полушарии; 2 — положение магнитного полюса в южном полушарии.

Fig. 2. Maps of absolute values of the components of the Earth's magnetic field of the polar caps for the sea level for the epoch of 2025 (model SPbF IZMIRAN). Northern polar cap: *a* — vertical component *Z*; *b* — northern component *X*; *в* — eastern component *Y*. Southern polar cap: *г* — vertical component *Z*; *д* — northern component *X*; *е* — eastern component *Y*. 1 — position of the magnetic pole in the northern hemisphere; 2 — position of the magnetic pole in the southern hemisphere.

осуществлено на высотах полета миссий космических аппаратов (КА) CHAMP и Swarm в интервале высот 400–530 км. Сопоставление модели магнитного поля Арктики и Антарктики с эмпирическими данными измерений КА CHAMP и Swarm выявило хорошее согласие модели и измерений КА. При интенсивности магнитных аномалий модуля и аномалии *Z*-компоненты на высоте 400 км до ± 15 нТл, расхождения аномалий в Северном Ледовитом океане (СЛО) составляют 1–2 нТл (Копытенко, Петрова, 2016; Petrova et al., 2022a, 2022b; Thébaud et al., 2016).

На высоте 100 км амплитуды аномалий модуля вектора и вертикальной компоненты МПЗ изменяются в диапазоне ± 200 нТл [Mandea, Thébaud, 2007; Maus et al., 2007; Thébaud et al., 2016].

На высоте 400 км интенсивность магнитных аномалий модуля и аномалии *Z*-компоненты изменяются в диапазоне до ± 15 –20 нТл (Копытенко, Петрова, 2016; Petrova et al., 2022a, 2022b; Thébaud et al., 2016).

Анализ информативности аномалий модуля и компонент МПЗ в интервале высот от 300 до 800 км показал, что интенсивность аномалий в СЛО в околоземном космическом пространстве превышает уровень инструментальной погрешности измерений КА более чем в 5–10 раз, что важно для решения задач космической навигации (Kopytenko et al., 2019; 2019b; 2021).

Карты компонент отражают характер намагниченности пород источников магнитных аномалий земной коры. Информативность магнитных аномалий в околоземном пространстве

в интервале высот от поверхности Земли до 800 км используется в научных и практических целях для решения навигационных и геолого-геофизических задач при изучении океанической коры и магнитоактивных горизонтов магнетитовых зон земной коры (Наливкина, Петрова, 2018). Аномалии компонент МПЗ представляют интерес для исследования строения древних платформ, поиска и разведки твердых полезных ископаемых (Копытенко и др., 2019; Петрова, Копытенко, 2019; Петрова, Латышева, 2025; Petrova et al., 2019, 2022a).

С 2022 г. модель компонент МПЗ применяется для целей геонавигации и позиционирования процесса бурения нефтяных скважин. Для геонавигации на территориях разрабатываемых месторождений строятся локальные глубинные модели абсолютных значений элементов МПЗ в виде трехмерных геомагнитных кубов. Это позволяет рассчитывать значения модуля и компонент на эксплуатационные глубины и временные интервалы прогнозирования траекторий наклонно-направленного бурения.

КОМПОНЕНТНЫЕ МОДЕЛИ МПЗ СПБФ ИЗМИРАН АВРОРАЛЬНЫХ ЗОН СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ ЗЕМЛИ

Для обеспечения магнитной навигации в околоземном космическом пространстве в диапазоне высот от поверхности Земли до 1000 км авторами статьи построена мировая пространственная модель абсолютных значений эле-

ментов земного магнетизма (Petrova, Latysheva, 2024). В настоящей работе на основе цифровой пространственной модели на эпоху 2025 г. авторами рассматриваются модели компонент МПЗ авроральных зон северного и южного полушарий (рис. 3). Это дало возможность сравнить динамику пространственных изменений компонент магнитного поля с эволюцией положений овалов полярных сияний и ионосферных неоднородностей, влияющих на качество радиосвязи. Причиной нарушения работы спутников и навигационных систем являются физические процессы, происходящие в ионосфере авроральных зон на высотах от 80 до 800 км.

В последнее десятилетие наблюдалось значительное изменение величины и направления вектора МПЗ, в результате чего произошло ускорение движения магнитного полюса (МП) в северном полушарии (рис. 3а), и вопрос о направлении пространственного смещения оптического овала стал весьма актуальным (Kopytenko et al., 2019a; Petrova, Latysheva, 2024).

Впервые магнитная модель абсолютных значений компонент МПЗ северной авроральной зоны была построена в 2018 г. для исследования зависимости положения овала полярных сияний от направления перемещения МП (Kopytenko et al., 2019a).

Основной интерес вызывает схожесть смещения оптического овала с изменениями компонент магнитного поля авроральной зоны и уточнение его современного положения. Динамика оптического овала служит индикатором состояния и смещения овала ионосферных неоднородностей,

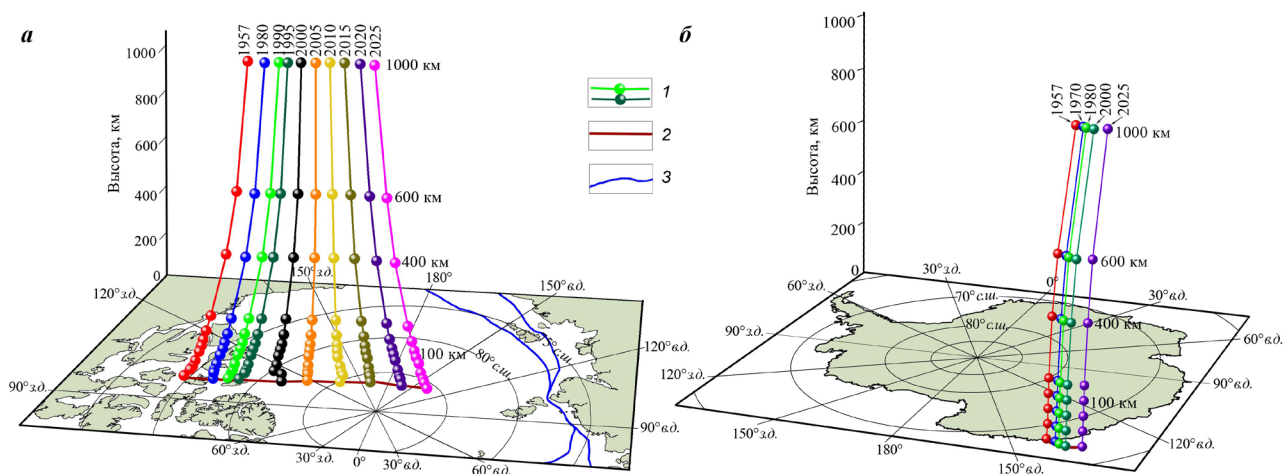


Рис. 3. Эволюция положения магнитных полюсов в северном и южном полушарии за период с 1957 по 2025 гг. в интервале высот от 0 до 1000 км, рассчитанная по значениям Н-компоненты модели СПБФ ИЗМИРАН: а — северное полушарие; б — южное полушарие. 1 — положение магнитного полюса в диапазоне высот от 0 до 1000 км; 2 — траектория магнитного полюса по поверхности Земли; 3 — Трансарктический транспортный коридор.

Fig. 3. Evolution of the position of the magnetic poles in the northern and southern hemispheres for the period from 1957 to 2025 in the altitude range from 0 to 1000 km, calculated using the H-component values of the SPbF IZMIRAN model: а — Northern Hemisphere; б — Southern Hemisphere. 1 — magnetic pole position in the altitude range from 0 to 1000 km; 2 — magnetic pole trajectory along the Earth's surface; 3 — Transarctic Transport Corridor.

нарушающего функционирование космических навигационных систем в высокоширотных областях Арктики, в частности, в акватории Северного морского транспортного коридора (СМТК) (Захаров и др., 2020; Филатов и др., 2015; Petrova, Latysheva, 2024;). Высокоэнергичные заряженные частицы плазмы солнечного ветра проникают в ионосферу вдоль силовых линий МПЗ, вызывая полярные сияния и неоднородности в ионосфере, создающие изменения амплитуды и фазы трансionoсферных радиосигналов. Флуктуации полного электронного содержания (ПЭС) являются доминирующим источником воздействия на навигационный сигнал и приводят к срывам приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (Захаров и др., 2020). Это создает помехи в системах спутникового позиционирования, ведет к сбоям навигационных параметров и влияет на распространение трансionoсферных радиоволн и качество коротковолновой радиосвязи, создавая дополнительные риски навигации в акватории СМТК и в воздушном пространстве Арктики (рис. 3а) (Petrova, Latysheva, 2024).

В период с 1957 по 2025 гг. в северном полушарии продолжалось продвижение МП и пере-

мещение магнитного поля авроральной зоны, увлекающего овал северных сияний и овал ионосферных неоднородностей в направлении Таймыра (рис. 4). Существенное усиление солнечной активности почти до максимальных значений приводит к необходимости регулярного исследования изменений положения овалов при различной возмущенности МПЗ для уменьшения погрешности позиционирования.

Овал полярных сияний наблюдается на высотах 80–120 км, овал ионосферных неоднородностей проявляется на высотах более 400–450 км (Захаров и др., 2020; Chernous et al., 2018). Для получения представлений об изменении МПЗ для высот 0, 20, 30, 50, 80, 100, 120, 150, 200, 400, 600 и 1000 км рассчитано положение МП (рис. 3, 4). Это позволило описать эволюцию полюсов МПЗ от поверхности до высот овалов полярных сияний и ионосферных неоднородностей за период с 1957 по 2025 гг.

Конфигурация полярных сияний и неоднородностей ПЭС в возмущенные дни имеет форму овалов на высотах около 80–200 и 200–450 км и пространственно определяется геометрией силовых линий МПЗ. Данные о пространственно-временном распределении полярных сияний

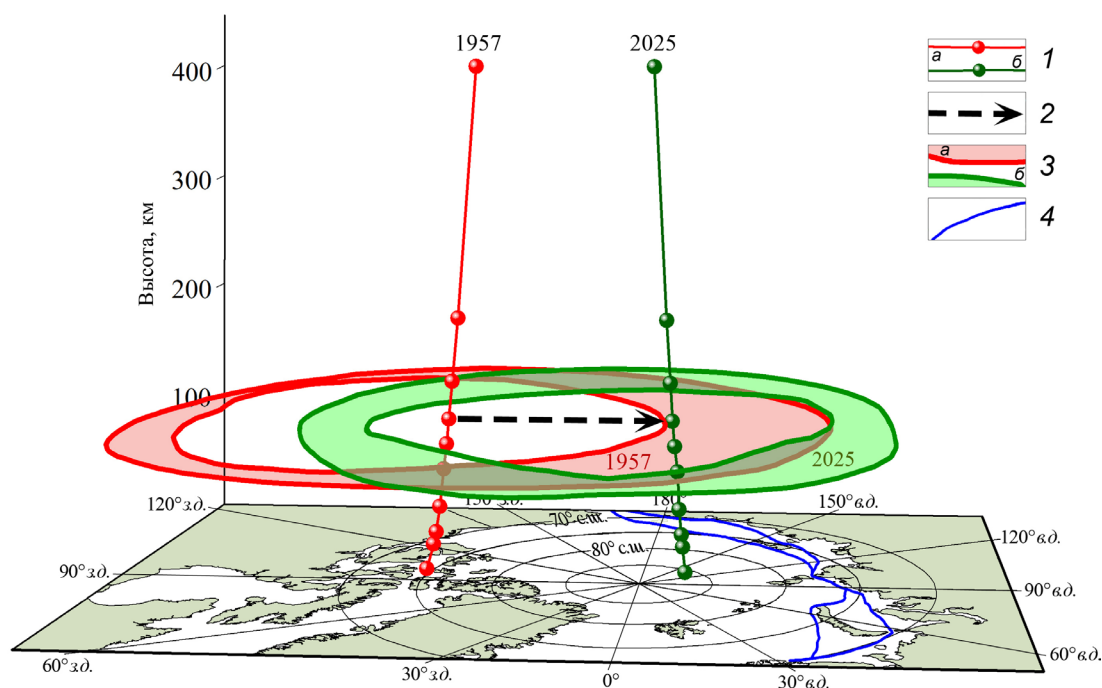


Рис. 4. Пространственное положение овалов северных сияний 1957 и 2025 гг. в условиях слабой геомагнитной активности: 1 — положения магнитных полюсов от поверхности Земли до высоты 400 км (*a* — 1957 г., *б* — 2025 г.); 2 — траектория смещения магнитного полюса с 1957 по 2025 гг. (высота 120 км); 3 — северные авроральные овалы: *a* — 1957 г. (Хорошева, 1967); *б* — овал 25.04.2025 ($K_p = 2$) по прогнозу модели OVATION (Machol et al., 2012); 4 — границы трасс Трансарктического транспортного коридора.

Fig. 4. Spatial positions of the 1957 and 2025 northern lights ovals under conditions of weak geomagnetic activity. 1 — positions of the magnetic poles from the Earth's surface to an altitude of 400 km (*a* — 1957 г., *б* — 2025 г.); 2 — trajectory of the magnetic pole shift from 1957 to 2025 (altitude 120 km); 3 — northern auroral ovals: *a* — 1957 (Khorosheva, 1967); *б* — oval of 25.04.2025 ($K_p = 2$) according to the OVATION model forecast (Machol et al., 2012); 4 — boundaries of the Transarctic Transport Corridor routes.

являются маркером состояния овала неоднородностей ПЭС (Филатов и др., 2015; Chernous et al., 2018).

В результате исследования пространственного положения овала полярных сияний в северном полушарии было установлено, что траектория смещения кромок овала северного сияний коллинеарна эволюции Н- и Z- компонент МПЗ (Petrova, Latysheva, 2024). Анализ магнитного поля авроральной зоны показал, что сонаправленное перемещение овала северных сияний проявляется в Н- и Z-компонентах МПЗ. В период с 1957 по 2025 гг. в магнитоспокойные дни смещение границ овала сияний происходило в направлении траектории движения МП, фиксирующейся минимумом Н-компоненты, со сдвигом, задаваемым перемещением максимумов значений Z-компоненты МПЗ.

Овал северных сияний с 1957 по 2023 гг. продвинулся коллинеарно траектории движения Н-компоненты от Канадской магнитной аномалии в сторону Таймыра почти на 1400 км со смещением на 200 км в направлении сдвига максимума Z-компоненты Сибирской мировой аномалии (Petrova, Latysheva, 2024). С 1957 по 2025 гг. овал полярных сияний переместился в сторону Таймыра к Сибирской магнитной аномалии на 1500 км по Н-компоненте со смещением на 300 км по Z-компоненте (рис. 4).

Исследование эволюции Н- и Z-компонент МПЗ и овала полярных сияний с 1957 по 2025 гг. позволило получить, во-первых, современное местоположение овала, и, во-вторых, дать оценку характера смещения местоположения оптического овала и овала ионосферных неоднородностей в топологическом пространстве компонент МПЗ авроральной зоны Арктики (Petrova, Latysheva, 2024), что имеет важное практическое значение для морской и аэрокосмической навигации.

Авторами настоящей работы по пространственной магнитной модели компонент СП6Ф ИЗМИРАН проведены аналогичные многочисленные повысотные расчеты компонент авроральной зоны южной полярной области Земли. Как и в случае с северной полярной шапкой, это дает возможность оценить динамику перемещения южного МП, характер изменений компонент магнитного поля и связать их с эволюцией положения овала полярных сияний и овала ионосферных неоднородностей в южном полушарии с целью прогноза неблагоприятных периодов для приема спутниковых сигналов.

Определение современного местоположения овала сияний имеет первостепенное практическое значение, так как наличие пространственно-временной связи полярных сияний и возмущений неоднородностей ПЭС дает

возможность осуществить прогноз состояния ионосферы и условий приема GPS/ГЛОНАСС сигналов. Исследование современного местоположения овала полярных сияний по прогнозам модели OVATION (Machol et al., 2012) и прогноз перемещения овала неоднородностей в пространстве компонентной модели авроральной зоны позволяет оценить зоны сбоя в работе навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, районы нарушений условий распространения транс-ионосферных радиоволн и коротковолновой радиосвязи в Арктике и Антарктике. Это способствует повышению точности позиционирования в акватории и воздушном пространстве СЛО, в Антарктиде и морях Южного океана.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТ МПЗ СП6Ф ИЗМИРАН ДЛЯ ГЕОНАВИГАЦИИ И ПРОВОДКИ СКВАЖИН

Впервые для целей геонавигации цифровая модель абсолютных значений модуля и компонент МПЗ СП6Ф ИЗМИРАН опробована на скважинах нефтяного месторождения (НМ) I в Печорском море (рис. 5).

Для геонавигации операций горизонтального и наклонно-направленного бурения на разрабатываемых месторождениях создаются локальные глубинные сеточные гибридные модели магнитного поля (ЛГММП) в виде трехмерных геомагнитных кубов. Локальная модель ЛГММП строится на основе компонентной модели МПЗ СП6Ф ИЗМИРАН и позволяет рассчитывать абсолютные значения модуля и компонент от поверхности до эксплуатационных глубин бурения скважины. Модель учитывает изменение величины элементов МПЗ с глубиной в процессе бурения. Это дает возможность делать прогноз значений модуля и компонент МПЗ на задаваемые глубины и временные интервалы прогнозирования траектории бурения наклонно-направленных скважин от устья до забоя. Начиная с 2022 г. геомагнитная модель ЛГММП СП6Ф ИЗМИРАН успешно применяется для позиционирования процесса бурения нефтяных скважин (Бухтояров и др., 2024).

За 2022–2024 гг. модель ЛГММП опробована на 14 скважинах нефтяного (I), газоконденсатного (II) и нефтегазоконденсатного (III) месторождений, расположенных севернее 60° с.ш. (рис. 5, 6), путем сравнения с данными замеров телесистемы MWD (Measuring While Drilling) — измерений инклинометрических данных в процессе бурения.

Для районов месторождений по моделям ЛГММП рассчитываются значения модуля и компонент в виде цифровой матрицы с равномерным шагом. На территориях месторождений

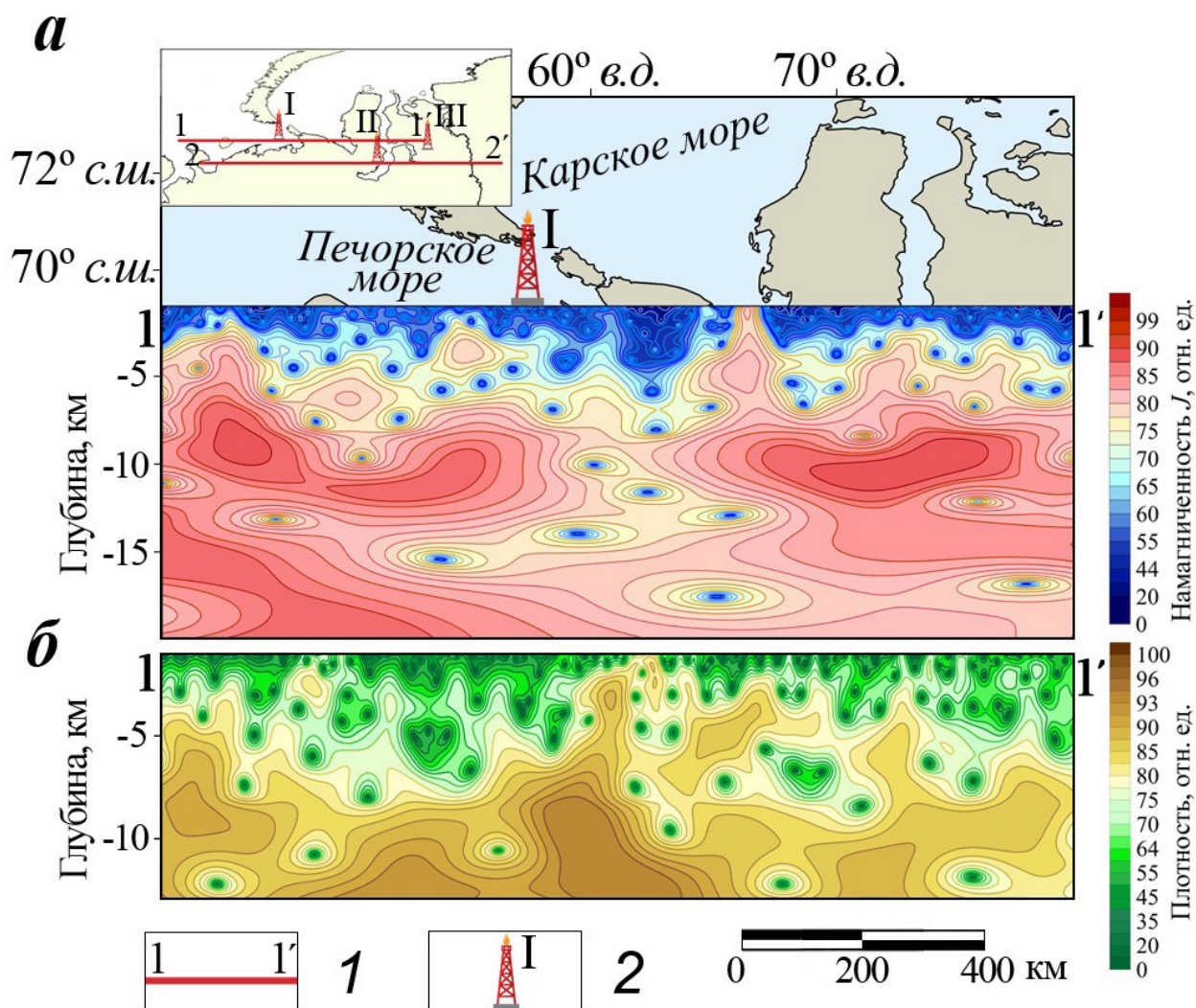


Рис. 5. Геофизические разрезы земной коры в районе месторождения I; на врезке — схема профилей, проходящих через районы применения локальных глубинных магнитных моделей для целей геонавигации и позиционирования процессов горизонтального и наклонно-направленного бурения; *a* — разрез по аномалиям МПЗ; *b* — плотностной разрез. 1 — профиль; 2 — скважина.

Fig. 5. Geophysical sections of the Earth's crust in the area of deposit I; The inset shows the scheme of application areas of local deep magnetic models for geonavigation and positioning of horizontal and directional drilling processes; *a* — section based on anomalies of the Earth's magnetic field; *b* — density section. 1 — profile; 2 — well.

для глубин устья и забоя скважин строятся карты по матрицам абсолютных значений модуля и компонент. Элементы магнитного поля вдоль траекторий стволов скважин представляются в виде таблиц для координат, дат и глубин замеров MWD.

Для определения точности модели ЛГММП на всех скважинах проводилась оценка расхождений расчетов по модели ЛГММП с фактическими данными MWD. Кроме того, при проведении замеров в интервале эксплуатационных глубин бурения скважин расчеты по модели ЛГММП сопоставлялись с данными по модели HDGM (High Definition Geomagnetic Model) — геомагнитной модели высокого разрешения Национального Центра Геофизических Данных США (NGDC), использовавшейся на месторож-

дениях ранее, но недоступной в настоящее время для геонавигации месторождений на территории РФ. Модель ЛГММП показала хорошую сходимость с измерениями магнитного поля MWD и с моделью HDGM. Среднеквадратическое расхождение с моделью HDGM составило $\sigma = 10$ нТл по модулю, $\sigma = 0.1^\circ$ по D и $\sigma = 0.1^\circ$ по I (Бухтояров и др., 2024). Среднеквадратическое значение отклонений D и I модели СПбФ ИЗМИРАН с доверительной вероятностью 95 % составляет ± 0.1 – 0.2° с данными обсерваторий Мировой сети и каталога СЛО для высокоширотных районов Арктики (Копытенко, Петрова, 2016).

В результате расчетов траекторий для скважин месторождения I Печорского моря (рис. 5) было показано, что модель СПбФ ИЗМИРАН, включающая аномалии земной коры по данным

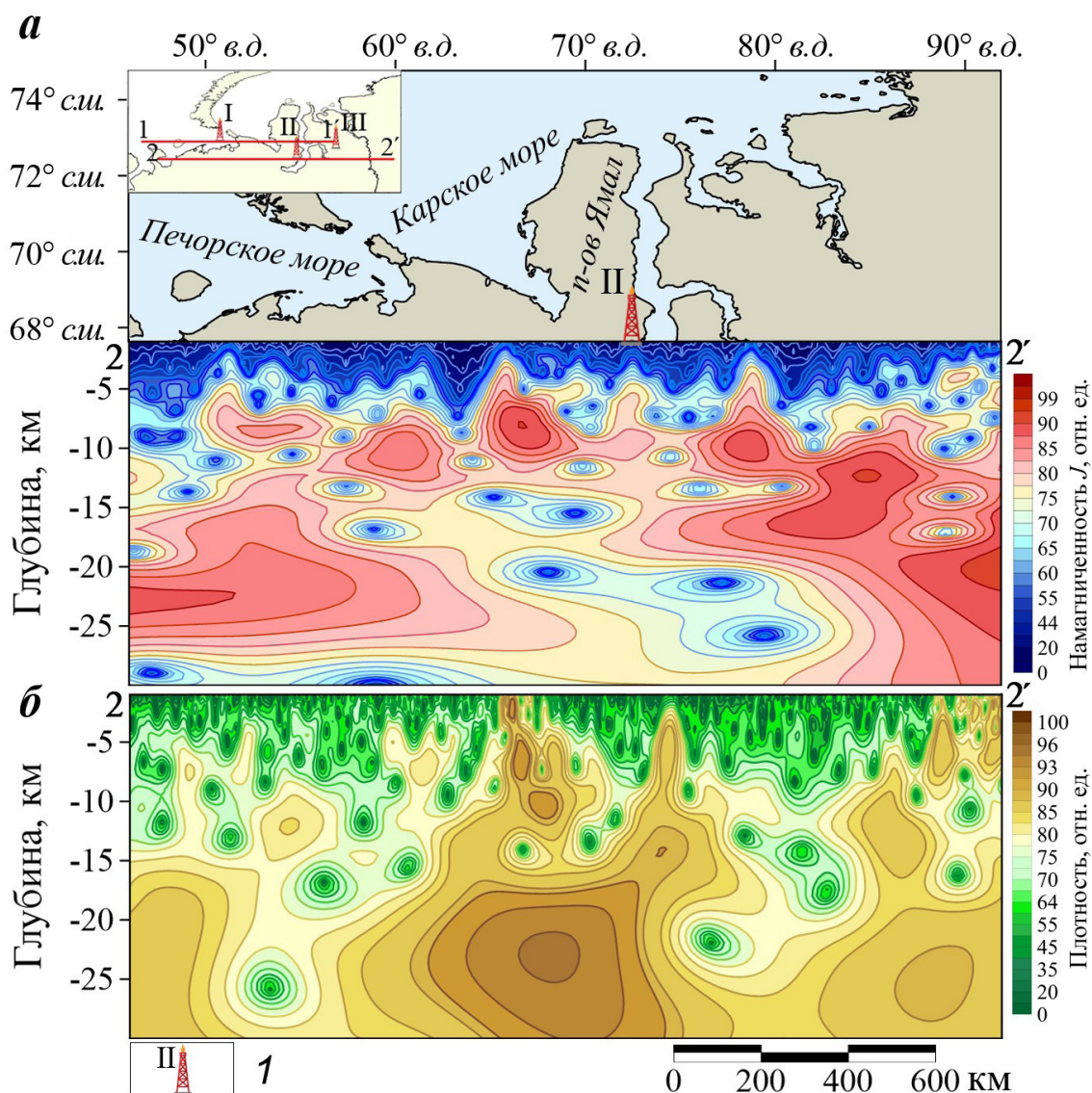


Рис. 6. Геофизические разрезы земной коры в районе месторождения II: *a* — разрез по аномалиям МПЗ; *б* — плотностной разрез. *I* — скважина.

Fig. 6. Geophysical sections of the Earth's crust in the area of deposit II: (*a*) — section based on anomalies of the Earth's magnetic field; (*б*) — density section. *I* — well.

приземных магнитных измерений, относится к классу геомагнитных моделей IFR (In-Field Reference) — моделей МПЗ высокого разрешения, учитывающих магнитные аномалии земной коры. Модель ЛГММП позволяет вычислять параметры для разработки кодов ошибок и расчета размеров эллипсов неопределенности расположения стволов скважин по классификации ISCWSA (Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy) — отраслевого координационного комитета по точности инклинометрии скважин Международного сообщества инженеров-нефтяников.

Таким образом, компонентная модель ЛГММП СПбФ ИЗМИРАН, соответствующая моделям высокого разрешения IFR1 (по классификации ISCWSA), может обеспечи-

вать процессы бурения нефтяных и газовых скважин отечественными геомагнитными данными. Модель ЛГММП успешно применяется для геонавигации процесса наклонно-направленного бурения, определения траекторий и проводки нефтяных скважин в Печорском море (Бухтояров и др., 2024, 2025).

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛИ ЛГММП ПРИРАЗЛОМНОГО НМ

Наибольший объем работ по оценке возможности замены модели HDGM США на модель ЛГММП СПбФ ИЗМИРАН выполнен на месторождении I Печорского моря (рис. 5) (Бухтояров и др., 2024). Месторождение находится в авральной зоне, характеризующейся высоким

уровнем возмущенности магнитного поля. В 1986 г. СПбФ ИЗМИРАН и Северное морское научно-производственное геолого-геофизическое объединение (Севморгео) провели морскую магнитную съемку компонент МПЗ Печорского моря (Копытенко и др., 1998). Погрешность измерений в магнитоспокойные периоды составила 4.5–10 нТл по силовым компонентам и $\pm 0.1^\circ$ по D и I при уровне возмущений меньше 100 нТл.

Для изучения элементов геомагнитного поля от устья скважины до глубины забоя авторами настоящей работы построена локальная модель ЛГММП Печорского моря, содержащая аномалии земной коры по гидромагнитным измерениям. На основе модели были построены карты абсолютных и аномальных значений модуля, D и I и рассчитаны карты разностей значений между уровнями устья и забоя с учетом временных изменений магнитного поля за период бурения скважин.

Для проверки расчетов по модели ЛГММП вдоль траекторий бурения от устья до эксплуатационных глубин использованы данные MWD скважинных стволов на разных этапах направленного бурения.

Статистическая оценка погрешности расчетных абсолютных значений модуля, D, I, H- и Z-компонент ЛГММП проведена на траекториях 6 скважин от устья до интервала эксплуатационных глубин на месторождении I Печорского моря (рис. 5). Методом статистического анализа выполнены сравнения данных ЛГММП с фактическими данными измерений магнитометров системы MWD во время бурения эксплуатационных скважин и подтверждена высокая степень сходимости локальной модели с фактическими замерами (Бухтояров и др., 2024).

Оценка точности модели ЛГММП проводилась в 2022–2024 гг. путем сравнения значений модуля и компонент магнитного поля с данными измерений телесистемы MWD и данными коммерческой модели высокого разрешения HDGM. Для сравнения были выбраны замеры с минимальным воздействием магнитной интерференции по скважинам и с учетом влияния поля геомагнитных вариаций в магнитовозмущенные дни.

На основе точностных характеристик элементов модели ЛГММП (модуля, D, I, H- и Z-компонент МПЗ) проведена оценка параметров эллипса неопределенности позиционирования скважинного ствола в интервале глубин буровых работ. Эллипс неопределенности позиционирования прогнозирует безопасный интервал между стволами скважин и предотвращает столкновения с соседними скважинами (Бухтояров и др., 2024).

Анализ результатов сравнений значений модуля и компонент магнитного поля модели

ЛГММП с данными измерений телесистемы MWD и данными коммерческой модели высокого разрешения HDGM на месторождении I показал, что модель ЛГММП не уступает коммерческой модели высокого разрешения HDGM по точности, а по ряду параметров превышает ее и может выступать в качестве ее альтернативы.

В результате проведенных исследований модель ЛГММП СПбФ ИЗМИРАН отнесена по классификации ISCWSA к моделям высокого разрешения и по точности соответствует моделям класса IFR. Это позволило использовать ЛГММП для расчета эллипсов неопределенности стандартных кодов ошибок и произвести замену модели HDGM на модель ЛГММП СПбФ ИЗМИРАН для целей проводки скважин (Бухтояров и др., 2024).

ОЦЕНКА ВОЗОБНОВЛЯЕМОСТИ РЕСУРСОВ ПО МАГНИТНЫМ И ПЛОТНОСТНЫМ РАЗРЕЗАМ

Для визуализации неоднородностей строения земной коры и оценки условий возобновляемости ресурсов по магнитным аномалиям модели ЛГММП СПбФ ИЗМИРАН и аномалиям силы тяжести (Bonvalot et al., 2012) строятся магнитные и плотностные разрезы методом спектрально-пространственного анализа (рис. 5, 6) (Петрова, 1977; Петрова, Колесова, 1986; Петрова, Копытенко, 2019).

На петрофизических разрезах визуализируются особенности плотностных и магнитных свойств земной коры, выявляется характер соотношения субвертикальных и наклонных разломных нарушений, местонахождение флюидонасыщенных линз в ослабленных слоях земной коры и зоны повышенной трещиноватости. Пути миграции углеводородной подпитки отображаются на глубинных разрезах в виде каналов с пониженными магнитными и плотностными свойствами, пересекающими слои земной коры (Летников, 2006, 2015; Павленкова, 2019; Петрова, Копытенко, 2019; Petrova et al., 2019).

Глубина эксплуатационного бурения на месторождении I находится в интервале 2400–2500 м. На магнитном разрезе месторождения I (рис. 5a) показано, что наклонный канал углеводородной подпитки юго-восточного простирания прослеживается по цепочкам линз с глубины 7 км до продуктивного горизонта в верхней части осадочного чехла. Субвертикальный канал подпитывает месторождение I с глубины ~10 км, к нему примыкает латеральный ослабленный слой с глубины 10–17 км, где фиксируются линзы флюидной системы. Месторождения углеводородов с подпиткой по субвертикальным каналам с глубин ~15 км, могут быть отнесены

к классу долгоживущих (Ларочкина, 2011; Павленкова, 2019; Тимурзиев, 2013; Petrova, Demina, 2010; Petrova et al., 2011).

Глубина эксплуатационного бурения на газоконденсатном месторождении II составляет около 2000 м. На магнитном и плотностном разрезах субвертикальный канал подпитки просматривается с глубины ~10 км вплоть до продуктивного горизонта в верхней части чехла (рис. 6). Субвертикальная разломная зона нарушений хорошо выражена на плотностном разрезе с глубины 15 км. Она пересекает ослабленные магнитные слои, расположенные на глубинах 15, 12 и 7 км. Месторождение II отвечает условиям возобновляемости ресурсов и может быть отнесено к классу долгоживущих.

Долгоживущие месторождения осадочного чехла подпитываются из глубин фундамента. В нефтегазоносных бассейнах флюидные системы, образующиеся в ослабленных трещиноватых слоях средней коры на глубинах 10–15 км, играют ведущую роль в процессе транспорта флюида к поверхности (Летников, 2006, 2015; Павленкова, 2019). Важным условием возобновляемости ресурсов является наличие основных элементов в виде флюидоупоров в верхней части земной коры, флюидонасыщенных линз флюидных систем в ослабленных слоях средней части земной коры и глубинных подводящих каналов. Формирование месторождений происходит за счет восходящей миграции углеводородных флюидов через разломы, секущие кристаллический фундамент и нижние горизонты осадочного чехла. Концепция доминирующей роли восходящей миграции нефти подтверждена на известном супергигантском месторождении Ромашкинское в Татарстане, в Куюмбинско-Юрубчено-Тохомском ареале нефтегазоаккумуляции в Восточной Сибири и на долгоживущих месторождениях Северного моря (Ларочкина, 2011; Petrova, Demina, 2010; Petrova et al., 2011).

ВЫВОДЫ

СПбФ ИЗМИРАН исследует пространственное распределение элементов земного магнетизма и его вековых вариаций. Каждые пять лет на новую эпоху в институте создаются Мировые магнитные карты. В работе представлена мировая пространственная модель абсолютных значений компонент МПЗ земного шара на эпоху 2025 г., созданная на основе обновляемой и пополняемой магнитометрической базы векторных данных СПбФ ИЗМИРАН. Магнитные карты компонент востребованы для решения вопросов морской, воздушной и аэрокосмической навигации и широко используются для изучения строения земной коры, поисков и

разведки твердых полезных ископаемых. Новое поколение цифровых магнитных карт компонент МПЗ имеет фундаментальное, поисковое и прикладное значение для навигации в Мировом океане и околоземном пространстве.

На основе модели на эпоху 2025 г. созданы компонентные модели абсолютных значений МПЗ авроральных зон северного и южного полушарий в диапазоне высот от 0 до 1000 км. Компонентные модели позволяют оценить динамику перемещения МП, изменений элементов магнитного поля и сопоставить это с эволюцией положения овалов полярных сияний по модели OVATION (Machol et al., 2012), что дает возможность осуществить прогноз состояния ионосферы и условий приема GPS/ГЛОНАСС сигналов.

В результате ускорения движения МП в направлении Таймыра вопрос о характере дрейфа овала северных сияний стал весьма актуальным. Исследование эволюции H- и Z-компонент магнитного поля и овала северных сияний за период с 1957 по 2025 гг. позволило получить оценку параметров смещения местоположения оптического овала и овала ионосферных неоднородностей в топологическом пространстве компонент постоянного геомагнитного поля авроральной зоны Арктики.

В южном полушарии проводится исследование современного местоположения овалов полярных сияний по прогнозам модели OVATION (Machol et al., 2012). Компонентная модель авроральных зон позволила определить динамику перемещения МП и компонент МПЗ на высотах от уровня океана до ионосферных слоев и сравнить ее со смещением овала южных полярных сияний. Исследование расширяет возможности прогнозирования состояния ионосферы и условий приема GPS/ГЛОНАСС сигналов ионосферных неоднородностей, влияющих на качество радиосвязи в акватории Южного океана.

Проведенные исследования авроральных зон способствуют повышению точности позиционирования в акваториях и воздушном пространстве Арктики и Антарктики. Улучшение качества работы навигационных систем типа GPS/ГЛОНАСС имеет существенное значение для морской, воздушной и аэрокосмической навигации.

Локальная модель ЛГММП абсолютных значений элементов МПЗ опробована и успешно применяется для целей геонавигации и позиционирования процесса бурения нефтяных скважин в Печорском море. Расчет компонент проводится на эксплуатационные глубины и временные интервалы прогнозирования траекторий бурения наклонно-направленных скважин от устья до забоя.

Для визуализации неоднородностей строения земной коры и оценки условий возобновляемости разрабатываемых месторождений углеводородов по магнитным аномалиям модели компонент СПбФ ИЗМИРАН и аномалиям силы тяжести построены глубинные петрофизические разрезы, позволяющие выявлять каналы подпитки месторождений из ослабленных слоев земной коры.

Наиболее важным условием возобновляемости ресурсов является наличие флюидоупоров в осадочном чехле и подводящих каналов из флюидонасыщенных линз в средней части земной коры. В нефтегазоносных бассейнах флюидные системы наблюдаются в ослабленных слоях на глубинах 10–15 км. Они играют ведущую роль в процессе возобновляемости долгоживущих месторождений.

Основные направления дальнейших исследований для геонавигации направленного бурения связаны с изучением особенностей земной коры нефтегазоносных зон, влияющих на условия возобновляемости ресурсов и обеспечивающих долгоживучесть месторождений углеводородов.

Представленная в работе мировая пространственная модель абсолютных значений компонент МПЗ СПбФ ИЗМИРАН для земного шара позволяет рассчитывать аномалии компонент в широком диапазоне высот от уровня океана до ионосферных слоев околоземного пространства. Благодаря этому возможно исследование магнитоактивных горизонтов земной коры, что представляет интерес для изучения глубинного строения древних платформ с целью поиска и разведки твердых полезных ископаемых.

Работа подготовлена в ходе выполнения государственного задания по теме № 16.5. «Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей» № 0037-2014-000 (2022 г.), в рамках государственной программы РФ «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (Указ Президента РФ от 05.03.20 г. № 164) и Национального проекта «Стратегия развития Арктической зоны РФ до 2035 г.» (Указ Президента РФ от 26.10.2020 г. N 645).

Список литературы [References]

Баткова Л.А., Боярских В.Г., Демина И.М. Комплексная база данных компонент геомагнитного поля на акватории океанов по результатам съемок, выполненных на немагнитной шхуне «Заря» // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2007. Т. 47. С. 571–576 [*Batkova L.A., Boiarskikh V.G., Demina I.M.* A comprehensive database of the geomagnetic field's components of in the oceans based on the results of surveys performed on the non-magnetic schooner

Zarya // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2007. V. 47. P. 571–576 (in Russian)].

Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Петрова А.А. и др. Анализ возможности применения альтернативной геомагнитной модели для наклонно-направленного бурения // Бурение и нефть. 2024. № 12. С. 44–47 [*Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R., Petrova A.A. et al.* Analysis of the possibility of using an alternative geomagnetic model for directional drilling // *Burenie i nef't*. 2024. № 12. С. 44–47 (in Russian)].

Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Петров В.Г. и др. Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 25. № 4. С. 71–82. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-71-82> [*Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R., Petrov V.G. et al.* Geomagnetic data for directional drilling and well positioning // *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025. V. 25. № 4. P. 71–82 (in Russian)].

Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В., Джин Я. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной бури // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60. № 6. С. 769–782. <https://doi.org/10.31857/S0016794020060152> [*Zakharov V.I., Chernyshov A.A., Miloch W., Jin Y.* Influence of the ionosphere on the parameters of the GPS navigation signals during a geomagnetic substorm // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. V. 60. № 6. P. 754–767. <https://doi.org/10.1134/S0016793220060158>].

Карасик А.М., Почтарев В.И., Цуцкарев Б.М. Морские геомагнитные исследования на НИС «Заря». М.: Наука, 1986. 183 с. [*Karasik A.M., Pochtarev V.I., Tsutskarev B.M.* Marine geomagnetic research at the scientific research vessel Zarya. M.: Nauka, 1986. 183 p. (in Russian)].

Колесова В.И. Аналитические методы магнитной картографии. М.: Наука, 1986. 223 с. [*Kolesova V.I.* Analytical methods of magnetic cartography. M.: Nauka, 1986. 223 p. (in Russian)].

Колесова В.И., Почтарев Е.А. Черкаева Авторское свидетельство № 200894 СССР. 1984 г. [*Kolesova V.I., Pochtarev V.I., Cherkaeva E.A.* A.S. № 200894 USSR. 1984 (in Russian)].

Колесова В.И., Черкаева Е.А. Вычисление компонент аномального геомагнитного поля по данным модульных съемок при переменном направлении вектора главного поля // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26. № 6. С. 1036–1037 [*Kolesova V.I. Cherkaeva E.A.* Calculation of the components of the anomalous geomagnetic field based on the data of modular surveys with a variable direction of the vector of the main field // *Geomagnetism and Aeronomy*. 1986. V. 26. № 6. P. 1036–1037 (in Russian)].

Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Зайцев Д.Б. и др. Измерения геомагнитного поля на борту движущегося магнитного носителя с помощью трехкомпонентного магнитовариационного комплекса МВК–2 // Российский геофизический журнал. 1998. № 11–12. С. 45–49 [*Kopytenko Yu.A., Ismagilov V.S., Zaitsev D.B. et al.* Measurements of the geomagnetic field onboard a moving magnetic carrier using a three-component magnetovariation

- complex MVK-2 // Russian Geophysical Journal. 1998. №. 11–12. P. 45–49] (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Магнитные карты нового поколения для целей морской магнитной навигации // Труды XII конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА – 2014». СПб. 2014. С. 258–261 [Kopytenko Yu.A., Petrova A.A. New generation magnetic maps for marine magnetic navigation purposes // Proc. of the conf. «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki GA – 2014». Saint-Petersburg. 2014. P. 258–261 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 // Труды XV конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб: Б.и., 2020. С. 288–291 [Kopytenko Yu.A., Petrova A.A. World maps of the Earth's magnetic field component of the epoch 2020 // Materials of XV conf. «Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics». Saint-Petersburg: B.i., 2020. P. 288–291 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Навигационная информативность компонент магнитных аномалий на высотах до 20 км // Труды IV н.-т. конф. «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС». М. 2019. С. 218–220 [Kopytenko Yu.A., Petrova A.A. Navigation information content of magnetic anomaly components at altitudes up to 20 km // Proceedings of conference «Navigatsiia, navedenie i upravlenie letatelnyimi apparatami». Moscow. 2019. P. 21–220 (in Russian)].
- 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. 2016. Т. 9. № 2. С. 88–106 [Kopytenko Yu.A., Petrova A.A. The development and use of a component model of the Earth's magnetic field for magnetic cartography and geophysics // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2016. V. 9. Iss. 2. P. 88–106 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Латышева О.В.* Магнитные аномалии литосферы в околоземном космическом пространстве // Труды конф. «Магнетизм на Земле и в космосе». Москва. 2019. С. 91–95. <https://doi.org/10.31361/pushkov2019> [Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Latysheva O.V. Magnetic anomalies of the lithosphere in near-Earth space // Proc. «Magnetism on Earth and in space». Moscow. 2019. P. 91–95 (in Russian)].
- Ларочкина И.А.* Перспективы развития нефтедобычи в республике Татарстан // Георесурсы. 2011. № 4 (40). С. 2–6 [Larochkina I.A. Perspectives of oil output development in the Republic of Tatarstan // Georesources. 2011. №. 4 (40). P. 2–6 (in Russian)].
- Латышева О.В., Петрова А.А.* Специфика литосферы районов арктических морей с повышенной газонасыщенностью // Труды: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 2025. Вып. 1 (51). С. 163–167 [Latysheva O.V., Petrova A.A. The specifics of the the Arctic seas's lithosphere with high gas saturation // Proc. of the Conf. «Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields». 2025. Iss. 1(51). P. 163–167 (in Russian)].
- Летников Ф. А.* Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудообразования // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 12. С. 1296–1307 [Letnikov F.A. Fluids in indogenic processes and problems of metallogeny // Geology and Geophysics. 2006. V. 47. №. 12. P. 1296–1307 (in Russian)].
- Летников Ф.А.* Глубинные флюиды континентальной литосферы // Материалы всероссийского совещания «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы». ИЗКСОРАН. Иркутск. 2015. С. 11–21 [Letnikov F.A. Deep fluids of the continental lithosphere // Materials of the All-Russian meeting «Fluid regime of endogenous processes of the continental lithosphere». Irkutsk. 2015. P. 11–21 (in Russian)].
- Наливкина Э.Б., Петрова А.А.* Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ, 2018. 46 с. [Nalivkina E.B., Petrova A.A. The magnetite zone of the continental crust. Saint-Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2018. 46 p. (in Russian)].
- Павленкова Н.И.* Структурные особенности литосферы континентов и океанов и их природа // Геофизический журнал. 2019. Т. 41. № 2. С. 3–57. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i2.2019.164448> [Pavlenkova N.I. Unsolved problems of the global tectonics and possibility of their solutions // Geofizicheskii zhurnal. 2019. V. 41. № 2. С. 3–57 (in Russian)].
- Петрова А.А.* Методика спектрально-пространственного анализа геомагнитного поля // Геофизический сборник АН УССР. 1977. Вып. 76. С. 55–66 [Petrova A.A. Method of spectral-spatial analysis of the geomagnetic field // Geofizicheskii sbornik AN USSR. 1977. Iss. 76. P. 55–66 (in Russian)].
- Петрова А.А.* Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН. Москва. 2015. С. 412–423 [Petrova A.A. Digital maps component of the magnetic field induction vector // Sb. trudov IZMIRAN, Moscow: 2015. P. 412–423 (in Russian)].
- Петрова А.А., Колесова В.И.* Способ геофизической разведки. А.с. 1289232 СССР. 1986 [Petrova A.A., Kolesova V.I. Method of geophysical exploration. A.S. 1289232 USSR. 1986 (in Russian)].
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны Северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 41. № 1. С. 37–53. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53> [Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Fluid system of the Mamsko-bodaybinskiy mineragenic zone of the Northern Transbaikalia region // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. V. 1(41). P. 37–53 (in Russian)].
- Петрова А.А., Латышева О.В.* Локализация зон эндогенного влияния в областях с высоким уровнем газонасыщенности по аномалиям магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. 2025. Т. 65. № 2. С. 260–278. <https://doi.org/10.7868/S3034502225020104> [Petrova A.A., Latysheva O.V. Localization of zones of the fluid dynamic factor

- endogenous influence in areas with a high level of gas saturation // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2025. V. 65. № 2. P. 260–278 (in Russian).
- Почтарев В.И.* Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984. 232 с. [*Pochtarev V.I.* Earth's normal magnetic field. Moscow: Nauka, 1984. 232 p. (in Russian)].
- Тимурзиев А.И.* Современное состояние теории происхождения и практики поисков нефти: тезисы к созданию научной теории прогнозирования и поисков глубинной нефти // *Глубинная нефть*. 2013. Т. 1. № 1. С. 18–44 [*Timurziyev A.I.* The current state of the theory of the origin and practice of oil prospecting: theses on the creation of a scientific theory of forecasting and prospecting for deep oil // *Deep oil*. 2013. V. 1. № 1. P. 18–44 (in Russian)].
- Филатов М.В., Швеиц М.В., Пильгаев С.В. и др.* Полярные сияния как индикатор устойчивости сигнала GPS-приемника // *Труды КНЦ РАН*. 2015. № 6 (32). С. 93–100 [*Filatov M.V., Shvets M.V., Pilgaev S.V. et al.* Auroras as an indicator of GPS receiver signal stability // *Transactions KSC*. 2005. № 6 (32). С. 93–100 (in Russian)].
- Хорошева О.В.* Пространственно-временное распределение полярных сияний. М.: Наука, 1967. 82 с. [*Khorosheva O.V.* Spatial and temporal distribution of the aurora borealis. Moscow: Nauka, 1967. 82 p. (in Russian)].
- Щербakov И.А., Петрова А.А., Городецкий С.И.* Современные источники цифровой картографической информации для создания морских карт. Создание новых видов карт // *Записки по гидрографии*. 2017. № 304. С. 26–42 [*Shherbakov I.A., Petrova A.A., Gorodeczkij S.I.* Modern sources of digital cartographic information for creating nautical charts. Creating new types of maps // *Zapiski po gidrografii*. 2017. №. 304. P. 26–42 (in Russian)].
- Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al.* World Gravity Map // Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris. 2012. <http://bgi.omp.obs-mip.fr>
- Chernous S., Budnikov P., Shagimuratov I. et al.* Variations of GNSS signals in Euro-Arctic region during auroral Activity / 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods. Kiruna. 2018. P. 10.
- INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) [Электронный ресурс]. URL: <https://intermagnet.org/> (дата обращения 15.12.2024).
- International Geomagnetic Reference Field (IGRF) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/international-geomagnetic-reference-field> (дата обращения 07.12.2024).
- Kopytenko Yu. A., Chernouss S., Petrova A.A. et al.* The Study of Auroral Oval Position Changes in Terms of Moving of the Earth Magnetic Pole // *Problems of Geocosmos*—2018, Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences. 2019a. C. 289–297. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_25
- Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Alekseev V.F. et al.* Application of altitude models of Earth's magnetic field for solving geophysical problems // *Cosmic Research*. 2019b. Iss. 57. № 3. P. 163–168. <https://doi.org/10.1134/S0010952519030067>
- Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Guriev I.S. et al.* Analysis of the Informativity of the Earth's Magnetic Field in near-Earth Space // *Cosmic Research*. 2021. V. 59. № 3. P. 143–156. <https://doi.org/10.1134/S0010952521030059>
- Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., et al.* Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae // *Space Weather*. V. 10. Iss. 3. S03005. <https://doi.org/10.1029/2011SW000746>
- Petrova A.A., Demina I.M.* Features of the Earth's crust structure of oil-gas pools of the North Sea on the base of magnetic data // *Proc. 4th SPb International Conference & Exhibition*. Saint-Petersburg, Russia. 2010. P. 143.
- Petrova A., Demina I., Petrishchev M.* Detection of the deep approach fluid channels in the oil-and-gas basins using the geomagnetic data (North and Norwegian Seas) // *Proc. 10th ICAM*. Trondheim, Norway. 2011. P. 523–529.
- Petrova A.A., Kolesova V.I.* Study of spectral characteristics of the geomagnetic field region with different types of the Earth's crust // *Verof. des Zentralinstituts fur Physik der Erde*. 1981. T.1. № 70. P. 1200–1209.
- Petrova A.A., Kopytenko Y.A., Petrishchev M.S.* Deep fluid systems of Fennoscandia greenstone belts // *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. 2019. P. 239–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28
- Petrova A.A., Latysheva O.V.* Evolution of the Northern Auroral Oval in Light of Modern Changes in Earth's Magnetic Field // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024. V. 64. № 4. P. 476–489. <https://doi.org/10.1134/S0016793224600309>
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A.* Deep Structure of the Arctic and Antarctic according to Component Magnetic and Gravitational Anomalies // *Cosmic Research*. 2022a. V. 60. № 4. P. 331–347. <https://doi.org/10.1134/S0010952522030078>
- 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 Proc. in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2022b. P. 53–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_5
- Thebault E., Vigneron P., Langlais B. et al.* A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // *Planets and Space*. 2016. V. №. 68. Article number 126. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5>

ПЕТРОВА, ЛАТЫШЕВА

**SPATIAL MODEL OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD COMPONENTS
«SPBF IZMIRAN» FOR THE YEAR 2025 EPOCH AND ITS APPLICATION
IN GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL PRACTICE**

A.A. Petrova, O.V. Latysheva

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS,
St.-Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia, 199034*

Received May 30, 2025; revised April 9, 2026; accepted June 27, 2026

A global spatial model of the absolute values of the Earth's magnetic field components, «SPbF IZMIRAN» for the 2025 epoch is presented. The model is based on an updated vector magnetometric database with an IGRF-14 reference frame. The digital hybrid grid model has been verified by vector measurements at geomagnetic observatories of the World Network, at the levels of aeromagnetic and hydromagnetic surveys, and at the flight altitudes of the CHAMP and Swarm satellites. Component models of the auroral zones of the northern and southern polar regions have been constructed for altitudes of 0–1000 km. The dynamics of changes in magnetic field components, the evolution of the positions of auroral ovals, and ionospheric irregularities affecting the quality of radio communication in high-latitude regions have been studied. The high-resolution «SPbF IZMIRAN» component model is used in maritime, air, and aerospace navigation and is in demand for studying the structure of the Earth's crust and searching for mineral deposits.

Keywords: magnetic component model, models of auroral zones, geonavigation.