

ИТОГИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ СКЛОНЕНИЙ В ВЫСОКОШИРОТНЫХ МОРСКИХ ЭКСПЕДИЦИЯХ 2020–2021 ГОДОВ

В 2020–2021 годах было организовано несколько российских экспериментов по отработке технологии диагностики магнитных склонений штатным навигационным оборудованием кораблей, использования полученных измерений для оценки положения магнитных полюсов Земли в моделях магнитного поля Земли.

В модели главного магнитного поля Земли используется модель магнитного диполя в центре Земли. Ось гипотетического диполя наклонена к оси вращения Земли и пересекает поверхность Земли в двух противоположных точках, называемых геомагнитными полюсами. Их проекция на земную/морскую поверхность не совпадает с положением магнитных полюсов, где магнитное поле у поверхности Земли квазивертикально. Но именно магнитные полюса представляют интерес для навигации.

Определение положения магнитных полюсов осложнено их труднодоступностью для прямых измерений. Практические возможности удаленного определения положения магнитных полюсов Земли реализованы по многолетним наблюдениям магнитных обсерваторий, спутниковых (например, КА CHAMP и Swarm и др.) измерений магнитного поля Земли. Точность расчетов определяется качеством координатной привязки измерений, космической погодой и составляет 5–10 %. При этом расчеты положения полюсов по данным высокоточных наблюдений сети магнитных обсерваторий системы INTERMAGNET и спутниковых измерений проводятся раз в 20–30 лет. И каждые пять лет проводится корректировка моделей магнитного поля Земли¹.

Справочные координаты Северного магнитного полюса есть в Международной геомагнитной опорной модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field), модели World Magnetic Model, коммерческой Британской глобальной геомагнитной модели BGGM (British Global Geomagnetic Model) Британской геологической службы. Модель IGRF используется при калибровке магнитных компасов судов.

Схема экспериментов

Для оценки положения магнитных полюсов использована верификация модели IGRF путем оценки минимальной невязки с измеренными магнитными склонениями на квазизамкнутом маршруте судна²:

$$\oint_{t=0,T} (\varphi_{\text{изм}}(t) - \varphi_{\text{модель}}^{\text{год}}) dt \rightarrow 0, \quad (1)$$

где φ — магнитное склонение по измерениям и по модели; t — время; T — продолжительность эксперимента по времени по квазизамкнутому маршруту движения судна.

Выбор протяженного квазизамкнутого маршрута обусловлен попыткой нивелировать эффекты магнитной девиации судна, с которого производятся измерения магнитного курса и координат.

Для минимальной средней невязки по квазизамкнутому маршруту определяется используемый в (1)

момент времени в модели магнитного поля Земли. Это простейшая обратная задача для гладких функций.

В районах магнитных аномалий ошибка склонения у поверхности Земли может превышать 7–10°. С учетом опыта измерений магнитных склонений в Южном океане для выбраковки аномальных невязок использовалось условие³: $|\varphi_{\text{изм}}(t) - \varphi_{\text{модель}}^{\text{год}}| \leq 5^\circ$, что снижает потенциальные ошибки измерений от влияния береговых эффектов на магнитное поле Земли, потенциальных помех от работы судового оборудования, магнитных аномалий, суточных вариаций магнитного поля, магнитных бурь, ошибок оператора и гирокомпаса.

Техническую составляющую экспериментов обеспечивали: навигационный приемник сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), гирокомпас (ориентирован на географический полюс), магнитный компас. Они входят в штатное судовое оборудование. Точность показаний гирокомпаса и магнитного компаса составляет до 10 % от единицы деления шкалы, что достаточно для экспериментов и превышает точность картированных изогон (линий равных магнитных склонений — разницы между направлением стрелки компаса и направлением на истинный север вдоль оси вращения Земли) по модели IGRF. Измерения в экспериментах проводили через каждый час.

Разница показаний магнитного компаса и гирокомпаса в точке измерений соответствует магнитному псевдосклонению, так как надо учитывать намагниченность судна — магнитную девиацию. Влияние аномального магнитного поля на фоне основного магнитного поля мало. Если протяженность квазизамкнутого маршрута существенно превышает размеры магнитных аномалий, то их влияние войдет в систематическую ошибку измерений. Средняя невязка измеренных магнитных склонений с картированными магнитными склонениями по модели главного магнитного поля Земли на середину времени квазизамкнутого протяженного маршрута будет характеризовать отклонение магнитного полюса от его модельного положения. Предложенная схема измерений позволяет проводить эксперименты по определению магнитного полюса на значительном удалении от него.

Измерения магнитных склонений в Южном океане

В новейшей истории для поиска Южного магнитного полюса (ЮМП) Земли в России с 1958 года каждые 20–25 лет предпринимались морские экспедиции. Заканчивались они безрезультатно хотя бы потому, что внутрисуточные вариации положения ЮМП достигают $\pm 30 \text{ км}^4$.

Первый успешный эксперимент по оценке положения ЮМП был проведен в первой декаде апреля 2020 года на гидрографическом судне «Маршал Геловани».

Маршрут измерений 06.04.2020–09.04.2020 представлен на рис. 1 в прямоугольной проекции координат на фоне веера изогон по модели IGRF12 на 01.01.2020 в спокойных геомагнитных условиях. Синий цвет изогон указывает на отклонение модельного магнитного

¹ Тертышников А.В. Способ определения положения магнитного полюса Земли. Патент на изобретение по Заявке 2020134228/28(062757) от 19.10.2020.

² Тертышников А.В. Оценки положения Северного магнитного полюса в 2021 году // Геодезия и картография. 2024. № 7. С. 59–64.

³ Тарасов Л.В. Земной магнетизм. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2012. 184 с.

⁴ См.: Там же.

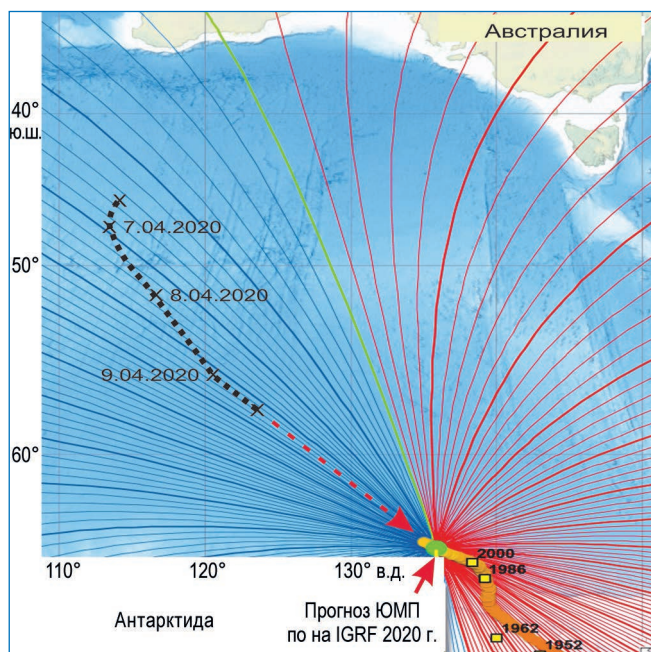


Рис. 1. Маршрут эксперимента на картах с изогнами по IGRF12

склонения на север, красный — на юг, зеленая линия — граница между ними. Красная стрелка в продолжение маршрута измерений ориентирована на предполагаемое положение ЮМП. Желтые квадраты соответствуют рассчитанному положению ЮМП по данным высокоточных измерений магнитных обсерваторий на указанный рядом с ними год. Оранжевая кривая — результаты моделирования смещения ЮМП по модели IGRF12.

При расшифровке измерений проявилась тенденция увеличения невязки между положениями ЮМП в 2000 году и в 2020 году, что обусловлено завышением скорости смещения модельного положения ЮМП на 2020 год. На фоне небольших скоростей смещения можно ограничиться этим выводом, так как суточные изменения положения ЮМП варьируют в интервале до ± 5 лет. В 2020 году был зафиксирован геомагнитный джerk — резкое скачкообразное изменение в скорости дрейфа магнитного поля на поверхности Земли⁵.

Прецедент инструментального определения положения ЮМП и его приоритет зафиксирован: «...«Маршал Геловани» стал первым судном Тихоокеанского флота, которое достигло района Южного магнитного полюса. По некоторым данным, он смещается на несколько километров в год, и вот его истинные координаты впервые за три десятка лет были подтверждены...»⁶.

Измерения магнитных склонений в Северном Ледовитом океане в 2021 году

Последние измерения положения СМП выполнялись по данным наземных магнитных обсерваторий в 2007 году.

⁵ Тертышников А.В. Оценки положения Северного магнитного полюса в 2021 году // Геодезия и картография. 2024. № 7. С. 59–64.

⁶ Гидрографическое судно «Маршал Геловани» вернулось во Владивосток: [Электронный ресурс]. URL: https://www.1tv.ru/news/2020-06-15/387672-gidrograficheskoe_sudno_marshal_gelovani_vernulos_vo_vladivostok

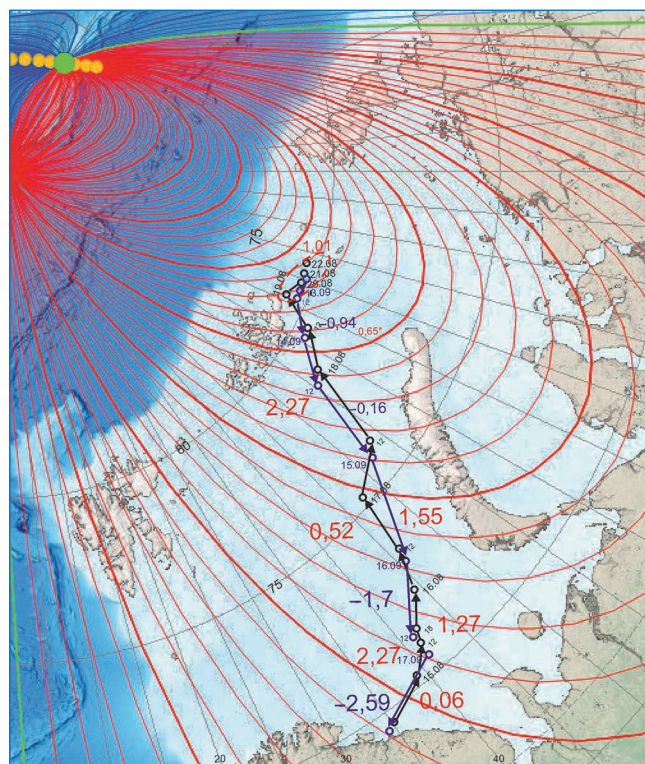


Рис. 2. Среднесуточные невязки магнитных склонений по маршруту эксперимента

Эксперименты по определению СМП проводились в 2021 году на НИС «Профессор Молчанов», на НЭС «Михаил Сомов», на гидрографическом судне «Горизонт»⁷. Лучшее качество измерений магнитных склонений в навигацию 2021 года было достигнуто на гидрографическом судне «Горизонт» по маршруту 14.08–17.09.2021 до Земли Франца-Иосифа и обратно (рис. 2) по периферии аномалий магнитного поля. Маршрут представлен на фоне рассчитанных по модели IGRF13 изогон на 01.01.2022. Модельное ежегодное положение магнитного полюса показано желтыми и зеленой (на 01.01.2022) точками (рис. 2). Отрезки зеленых линий — это положение нулевых изогон. На маршрутах показана временная привязка судна, в том числе внутрисуточные отметки времени.

Стрелки показывают направление движения корабля. Знак невязок от модельных склонений по IGRF13 представлен синими цифрами (отрицательные невязки) и красными (положительные) значениями справа от маршрута к Земле Франца-Иосифа и слева на обратном участке маршрута в градусах.

За время измерений только 15.08.2021 и 13.09.2021 К-индекс был 2. В конце экспедиции 17 сентября 2021 года был зафиксирован К-индекс = 3++, что соответствует слабой магнитной буре.

Минимальная невязка измерений с модельными данными позволяет использовать оценку положения Северного магнитного полюса в 2021 году по модели IGRF13: 86,400° с. ш. 156,786° в. д. (в 2022 году — 86,275° с. ш. 151,272° в. д.). СМП со скоростью 60–80 км в год смещается в сторону Таймыра.

Эта оценка подтвердилась в экспериментах на НЭС «Михаил Сомов» и на НИС «Профессор Молчанов». Са-

⁷ Тертышников А.В. Оценки положения Северного магнитного полюса в 2021 году // Геодезия и картография. 2024. № 7. С. 59–64.

мый короткий маршрут измерений был на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» 26 октября — 9 ноября 2021 года от Двинской губы до Новой Земли и обратно. Маршрут научно-экспедиционного судна «Михаил Сомов» 10–30 июня 2021 года прошел через положительную аномалию магнитного поля при подходе к Новой Земле.

В экспериментах 2020 и 2021 годов подтвердилось небольшое влияние магнитных бурь на измерения магнитных склонений на фоне невязок при пересечении аномалий магнитного поля Земли. При сравнении невязок учитывались габариты судов: дизель-электроход «Михаил Сомов» по габаритам почти вдвое больше дизельного НИС «Профессор Молчанов». Электродвигатели НЭС «Михаил Сомов» вносили дополнительные ошибки в показания магнитных компасов, особенно при дрейфе. Поэтому при дрейфе измерения не проводились. Были получены оценки магнитной девиации судов.

В невязках проявился и береговой эффект у юго-западной оконечности Новой Земли и в конце маршрутов при подходе к материку.

Точность расчетов магнитного поля над территорией Российской Федерации на высотах полетов спутников оценивается в $0,5^\circ$, что соответствует величине модельного смещения изогон с 2021 до 2022 года.

Таким образом, зафиксирован исторический прецедент и приоритет российских гидрографов и военных гидрометеорологов в определении положения магнитных полюсов⁸. В 2021 году проверенные модельные координаты СМП Земли: $86,400^\circ$ с. ш. $156,786^\circ$ в. д.; в 2022 году — $86,275^\circ$ с. ш. $151,272^\circ$ в. д.⁹ Есть основания предполагать, что ЮМП тормозится в своем смещении.

А.В. Тертышников
(Институт прикладной геофизики)

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА МЕГАЗООБЕНТОСА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Полярный филиал ВНИРО совместно с норвежским Институтом морских исследований в течение 20 лет проводит мониторинг мегазообентоса Баренцева моря. Проект, начавшийся как второстепенное исследование при траловой съемке донных рыб, постепенно перерос в масштабное направление, имеющее самостоятельную ценность. Отличительной особенностью данного мониторинга является получение данных о состоянии крупноразмерной фракции зообентоса буквально в режиме реального времени, без длительной камеральной обработки на берегу, что характерно для дночерпательной съемки. Кроме того, животные с многолетней продолжительностью жизни являются хорошими индикаторами климатических изменений, слабо реагирующими на сезонные процессы.

В работе использованы данные 3522 траловых уловов мегазообентоса, полученных в Баренцевом море в 2006–2025 годах. Для исследования был выбран район между 69° и 78° с. ш. и 20° и 50° в. д. Выбор данного

района был сделан по причине наиболее равномерного (в пространственно-временном аспекте) обеспечения данными. В качестве орудия лова применяли донный трал Campelen-1800 с раскрытием по горизонтали 15 м и с мелкоячеистой вставкой с размером ячеи 22 мм. Обычно траления выполнялись по 15 мин со скоростью около 3 узлов. Основным анализируемым параметром являлась общая биомасса зообентоса, пересчитанная на морскую милю. Из расчетов были исключены креветки семейства Pandalidae и крабы-вселенцы (камчатский и опилю). Также из анализа были исключены годы, когда съемки или не проводились на части акватории, или проводились с нарушением методики. Достоверность изменения биомассы во времени оценивалась однофакторным дисперсионным анализом, где грациями фактора являются годы.

Сохранение повышенного теплосодержания вод Баренцева моря в течение последних нескольких десятков лет оказало большое влияние на донную фауну Баренцева моря, что хорошо заметно по изменениям в мегазообен-

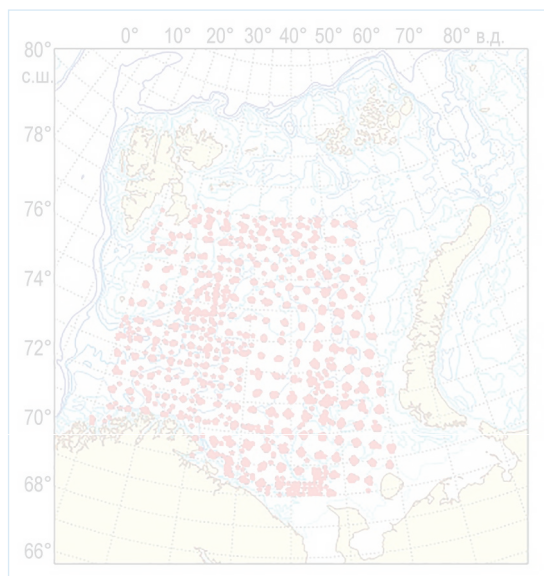


Схема расположения траловых станций в Баренцевом море в 2006–2025 годах



Динамика биомассы мегазообентоса на исследуемой акватории

⁸ Долгошева А. Российские ученые зафиксировали смещение Северного магнитного полюса в российский сектор Арктики // Санкт-Петербургские ведомости. 2025. 9 сент. № 166 (7988).

⁹ Тертышников А.В. Оценки положения Северного магнитного полюса в 2021 году // Геодезия и картография. 2024. № 7. С. 59–64.