

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЮЖНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ В КРУГОСВЕТНОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ НА ОИС ВМФ “АДМИРАЛ ВЛАДИМИРСКИЙ”

© 2022 г. И. В. Лыгин¹, *, Д. А. Арутюнян¹, **, А. А. Булычев¹,
К. М. Кузнецов¹, В. Т. Минлигареев²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва, Россия

²Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова (ФГБУ “ИПГ”), г. Москва, Россия

*E-mail: ivanlygin@mail.ru

**E-mail: david-20.97@mail.ru

Поступила в редакцию 30.07.2021 г.

После доработки 28.08.2021 г.

Принята к публикации 30.08.2021 г.

В период с декабря 2019 г. по июнь 2020 г. проходила кругосветная антарктическая экспедиция Военно-морского флота РФ при поддержке Русского географического общества, посвященная 200-летию открытия Антарктиды и 250-летию со дня рождения адмирала И.Ф. Крузенштерна на океанографическом исследовательском судне (ОИС) ВМФ “Адмирал Владимирский”. Одной из основных задач экспедиции было инструментальное определение положения Южного магнитного полюса (ЮМП), последнее определение которого было осуществлено более двадцати лет назад. Планирование магнитометрических работ, их методическое сопровождение и обработка полученных материалов выполнены сотрудниками кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета МГУ и Институтом прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова. По комплексу инструментальных определений (модульные протонные дифференциальные магнитометры, векторные трехкомпонентные феррозондовые магнитометры, судовой компас) положение ЮМП определено с погрешностью ± 5 км. Опираясь на инструментальные определения ЮМП в 1980 и 2000 гг., подтверждено, что в течение последних 40 лет перемещение ЮМП происходит с выдержанными скоростью и направлением.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, Антарктида, Южный магнитный полюс, скорость смещения, инструментальное определение, кругосветная антарктическая экспедиция, международные модели, океанографическое исследовательское судно, протонный магнитометр, гидромагнитная съемка, трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, компас, магнитное склонение, магнитная индукция.

DOI: 10.31857/S0002333722020065

ВВЕДЕНИЕ

Известный факт, что магнитное поле Земли (МПЗ) в целом постоянно изменяется. В последние столетия дипольный момент планеты монотонно убывает. Всего за 450 лет напряженность магнитного поля Земли уменьшилась почти на 20% [Дьяченко, 2003]. Изменение претерпевает не просто амплитуда поля, но меняется и его морфология, в том числе перемещаются магнитные полюса Земли. Скорость перемещения полюсов беспокоит не только ученых, но и простых обывателей, которых часто пугают неминуемой и скорой сменой положения полюсов (инверсией).

В настоящее время информацию о перемещении полюсов можно получить из моделей нор-

мального магнитного поля Земли. Наиболее часто используемые из них International Geomagnetic Reference Field (IGRF) и World Magnetic Model (WMM) [Thébault et al., 2015; NCEI..., 2020; Chulliat et al., 2020]. Модели строятся на основе спутниковых данных, наблюдений на магнитометрических обсерваториях и материалов магнитометрических съемок и накапливаются в виде коэффициентов разложения по сферическим гармоникам уже на протяжении нескольких десятилетий. Благодаря использованию постоянно работающих магнитометрических спутниковых миссий (проект Swarm и др.) модели ежегодно уточняются [Магниторазведка..., 2016]. Поскольку модели содержат и ретроспективную инфор-



Рис. 1. ОИС “Адмирал Владимирский” в Антарктиде.

мацию о нормальном магнитном поле, то они позволяют вычислить дрейф магнитных полюсов Земли. В отличие от северного магнитного полюса (СМП) для южного — не наблюдается ускорение его смещения, и он движется с меньшей скоростью [Mandea, Dormy, 2003]. Скорость дрейфа СМП достигала 48 км/год, а ЮМП — 18 км/год. Флуктуации магнитных полюсов проходят не соосно [Минлигареев и др., 2020]. Для обеспечения уверенного определения положения магнитных полюсов необходима их периодическая инструментальная верификация, что, безусловно, является важной мировой научно-практической задачей.

Кругосветная антарктическая экспедиция, посвященная 200-летию открытия Антарктиды и 250-летию со дня рождения адмирала И.Ф. Крузенштерна, проходила с 03.12.2019 по 08.06.2020 г. на ОИС ВМФ “Адмирал Владимирский” (рис. 1). Организатором экспедиции стал ВМФ РФ при участии Русского географического общества (РГО). Одной из основных задач экспедиции стало инструментальное определение положения ЮМП, которое не верифицировалось с 2000 г. [Осипов и др., 2020]. Оперативное планирование магнитометрических работ, их методическое сопровождение и обработка полученных материалов велась сотрудниками кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Институтом прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова [Арутюнян и др., 2020].

ИСТОРИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЮЖНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

Первая русская антарктическая экспедиция 1819–1821 гг. под руководством морских офицеров российского флота Фаддея Беллинсгаузена и Михаила Лазарева подтвердила предположение о существовании шестого материка — Антарктиды. Русская антарктическая экспедиция завершилась полным успехом, став второй (после Джеймса Кука), которая обошла всю Антарктиду и первой, доказавшей ее существование [Беллинсгаузен, 2008]. Во время этой экспедиции выполнялись наблюдения с судовым компасом, которые позволили дать первую инструментальную оценку положения ЮМП (рис. 2, табл. 1).

В 1841 г. Джеймс Кларк Росс в ходе целенаправленной морской экспедиции по определению положения магнитного полюса в Южном полушарии сумел приблизиться на расстояние 250 км к магнитному полюсу и по серии измерений магнитного наклона установил его положение [Дьяченко, 2003]. За год до него в экспедициях Д'Юрвиля и Уилкса также были сделаны оценки положения ЮМП. По всем четырем определениям ЮМП должен был находиться в пределах Земли Виктории в секторе 133° – 155° в.д. и 71° – 76° ю.ш., к востоку от моря Росса (табл. 1, рис. 2). Важно отметить, что, хотя местоположение ЮМП в 19 в. получено без непосредственного посещения, разброс по значениям координат оказался в масштабе Антарктиды небольшим

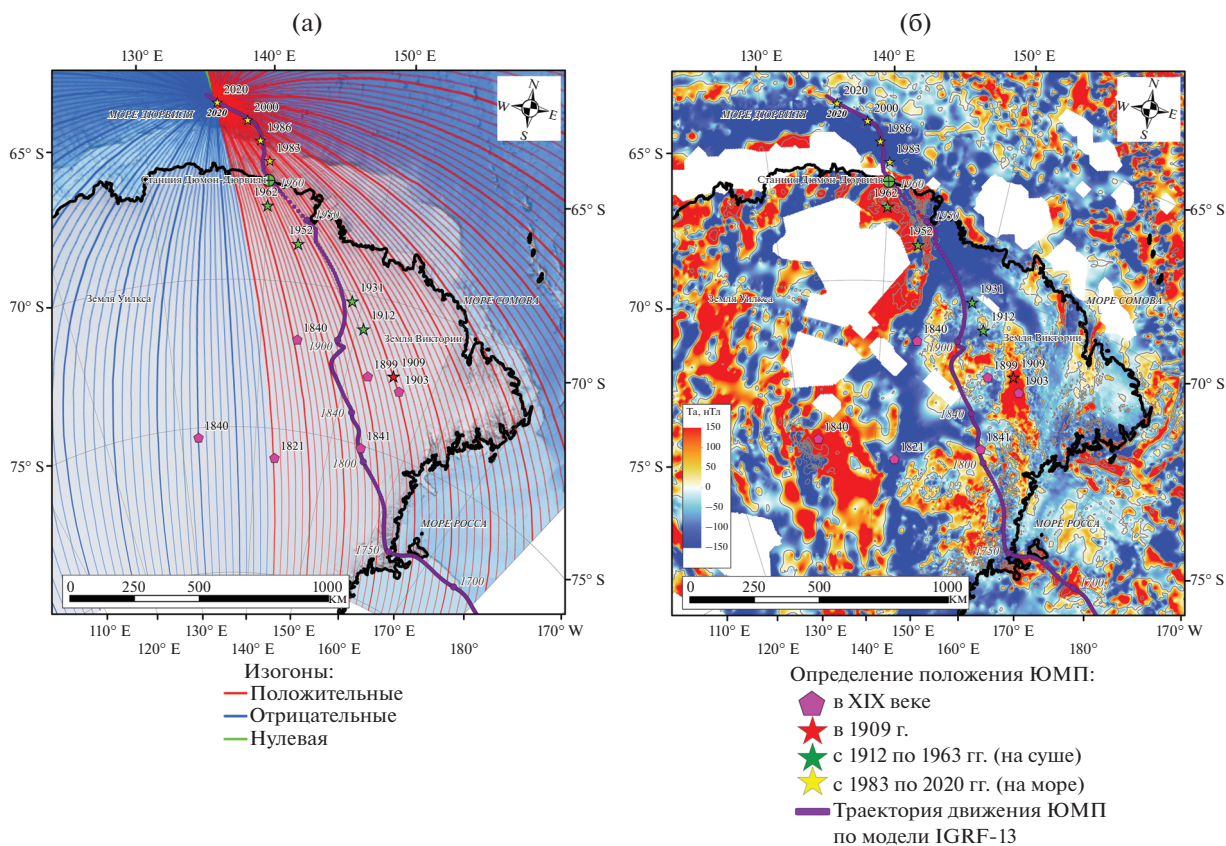


Рис. 2. Изменение положения Южного магнитного полюса по инструментальным измерениям и модели IGRF-13: (а) — на фоне карты склонений для 2020 г. по работе [Chulliat et al., 2020]; (б) — на фоне аномального магнитного поля (АМПЗ) по проекту ADMAP [Golynsky et al., 2018].

(сектор размером 500 км по долготе и 600 км по широте) и смещенным относительно Южного географического полюса на расстояние около 1800 км. Данные определения важны не только в историческом аспекте (табл. 1, рис. 2). Положение полюса, определяемое по модели IGRF-13 [Alken et al., 2021], отстоит от точки, обозначенной Дж. Россом почти 200 лет назад, не более, чем на 200 км (рис. 2).

Считается, что в 1909 г. ЮМП был достигнут отрядом экспедиции Шеклтона. Несмотря на титанические усилия отряда при имевшихся на тот момент обстоятельствах вертикальное наклонение было определено единожды и без должной проверки результатов измерений [Дьяченко, 2003]. От последующего определения 1912 г. ЮМП отстоял более чем на 200 км, что соответствует линейной скорости перемещения 69.6 км/год в течение трех лет, что по исследуемой динамике смещения ЮМП маловероятно. Интересно, что точка экспедиции Шеклтона находится в эпицентре положительной аномалии магнитного поля (рис. 2б), которая могла обусловить дополнительную ошибку в определении координат магнитного полюса. Координаты 1912 г. приходится считать

недостовверными, поскольку они дают оценку скорости с 1909 по 1912 и с 1912 по 1931 гг. 72 и 3.9 км/год соответственно.

Согласно последующим инструментальным определениям (в 1931, 1952, 1962 гг.) перемещение ЮМП происходило со строго выдержанным азимутом (308 градусов, северо-запад) и средней скоростью 15.4 км/год. Кривая смещения полюса по модели IGRF-13 проходит по более сложной траектории и с переменной скоростью, но вблизи точек инструментальных измерений. Так же, как точка Шеклтона, определения 1952 и 1962 гг. тяготеют к локальным положительным аномалиям магнитного поля.

В первой половине 1960-х годов произошло перемещение ЮМП с суши в акваторию моря Дюрвиля. Впервые определение координат магнитного полюса в морских условиях было выполнено кораблями ВМФ СССР в экспедиции Гидрографической службы Черноморского флота СССР на ОИС “Адмирал Владимирский” и “Фаддей Беллинсгаузен” (1983–1984 гг.) по специальной программе [Минлигарев и др., 2020] (рис. 3).

Таблица 1. Инструментальные определения положения ЮМП (по работе [Chulliat et al., 2020] с изменениями)

Год	Географические координаты ЮМП		Расстояние относительно предыдущего определения, км	Скорость перемещения относительно предыдущего определения, км/год	Экспедиция
	ю.ш.	в.д.			
ЮМП на суше					
1821	76°00′	142°50′	—	—	Беллинсгаузен по своим данным за 1820–1821 гг.
1840	75°20′	132°20′	300	16	Дюмулин, Купверт (д'Юрвиль)
1840	71°55′	144°00′	530	—	Уилкс
1841	75°05′	154°08′	475	—	Джеймс Росс
1899	72°40′	152°30′	275	4.7	Берначчи, Колбек – Southern Cross Expedition. Положение вычислено, но не посещено.
1903	72°51′	156°25′	130	32.5	Четвинд – Британская антарктическая экспедиция (1901–1904). Положение вычислено, но не посещено.
1909	72°25′	155°16′	62	10.3	Моусон, Дэвид, Маккей (экспедиция Шеклтона) Первое посещение ЮМП
1912	71°10′	150°45′	210	70	Вебб, Бэйдж, Харли
1931	70°20′	149°00′	113	3.9	Кеннеди
1952	68°42′	143°00′	295	14	Майо
1962	67°30′	140°00′	183	18.3	Барроус, Нэнли
ЮМП в акватории моря Дюрвиля					
1983	65°30′	139°30′	224	10.7	ВМФ СССР
1986	65°20′	139°10′	25	8.3	Квилт, Бартон
2000	64°40′	138°07′	90	6.4	Бартон
2020	64°5′	135°48′	130	6.5	ВМФ России

Факт определения координат полюса отмечен исторической фотографией гидрографов “Фаддея Беллинсгаузена” буя с надписью: “Южный магнитный полюс. 03.02.1983 г.” [Золотайкин, 2007] (рис. 4).

В тот момент удаление ЮМП от материка составляло около 70 км, а от кромки ледника – около 20 км. С 1962 по 1983 гг. средняя скорость перемещения составила 10.7 км/год с азимутом 355 градусов (рис. 2, табл. 2).

Два последующих инструментальных определения ЮМП были выполнены в 1986 и 2000 гг. австралийскими учеными на корабле Sir Hubert Wilkins [Barton, 2002]. В последнем случае для решения задачи был сконструирован специальный магнитометр, который позволял измерить горизонтальные компоненты магнитного поля. Аппаратура буксировалась за судном на немагнитной конструкции и была заключена в кольца Гельмгольца для компенсации влияния судна на показания магнитометра (рис. 5). Чарльз Бартон и его коллеги в своей статье [Barton, 2002] отмечают, что единственным недостатком их методики являлось отсутствие учета вариаций, из-за чего по-

люс изо дня в день “бегал” по площади измерений. И это очень важное обстоятельство, т.к. в экспедиции на ОИС “Адмирал Владимирский” (2019–2020 гг.) вариации МПЗ учитывались по магнитным обсерваториям Антарктиды и по дифференциальным магнитометрическим измерениям.

С 1983 по 2000 гг. ЮМП сместился на 245 км при средней скорости 6.6 км/год. На каждом последующем временном сегменте на море отмечается последовательное уменьшение скорости перемещения, фактически, с 18 до 6.5 км/год. То есть за последние 60 лет скорость перемещения ЮМП значительно уменьшилась.

Отклонение траектории смещения полюса по модели IGRF-13 при морских съемках ЮМП 1983, 1986 и 2000 гг. существенно меньше, чем от сухопутных определений. Данное обстоятельство, безусловно, обязано использованию большого количества современной и высокоточной информации (спутниковой, магнитовариационной) при построении модели нормального поля. В то же время непосредственно морские определения сами по себе оказываются более точными,



Рис. 3. ОИС “Адмирал Владимирский” в кругосветной антарктической экспедиции ВМФ СССР (1982–1983 гг.). Порт Веллингтон, Новая Зеландия.



Рис. 4. Постановка буя на месте определения ЮМП 03.02.1983 г.

Таблица 2. Технические характеристики ОИС “Адмирал Владимирский”

Характеристика	Параметры
Проект	852
Ввод в эксплуатацию, г.	1975
Водоизмещение, т	9120
Длина, м	147.8
Ширина, м	18.6
Осадка, м	6.4
Двигатели, шт.	Дизельные, 2
Мощность, л. с.	16000
Движитель, винты	2
Скорость хода, уз.	19
Дальность плавания, миль	25000
Автономность плавания, сут	90
Экипаж, чел.	170
Научная экспедиция, чел.	80

поскольку в отличие от сухопутных наблюдений выполнены по методике непрерывных площадных измерений и в гораздо более сжатые сроки, что минимизирует эффект “блуждания” полюса при наличии магнитных вариаций.

Начиная с 2016 г. необычно большая скорость перемещения СМП привела к серьезным ошибкам в расчетах модели 2015 г. Для устранения такого рода ошибок с начала 2019 г. началось досрочное обновление моделей МПЗ. В феврале 2019 г. обновлена международная модель WMM Национальным геофизическим центром данных США (NGDC). В декабре того же 2019 г. Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) выпущена очередная версия модели IGRF-13 [Минлигареев и др., 2020].

АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КРУГОСВЕТНОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ ОИС “АДМИРАЛ ВЛАДИМИРСКИЙ” (2019–2020 гг.)

Кругосветная экспедиция проводилась на ОИС ВМФ “Адмирал Владимирский” Гидрографической службы Балтийского флота. На том же судне, которое участвовало в антарктической экспедиции 1983–1984 гг. Основные параметры ОИС “Адмирал Владимирский” приведены в табл. 2.

Перед объединенной межведомственной геофизической группой ученых по исследованию МПЗ были поставлены задачи не только по инструментальному определению положения ЮМП, но и связанные с исследованием аномального магнит-

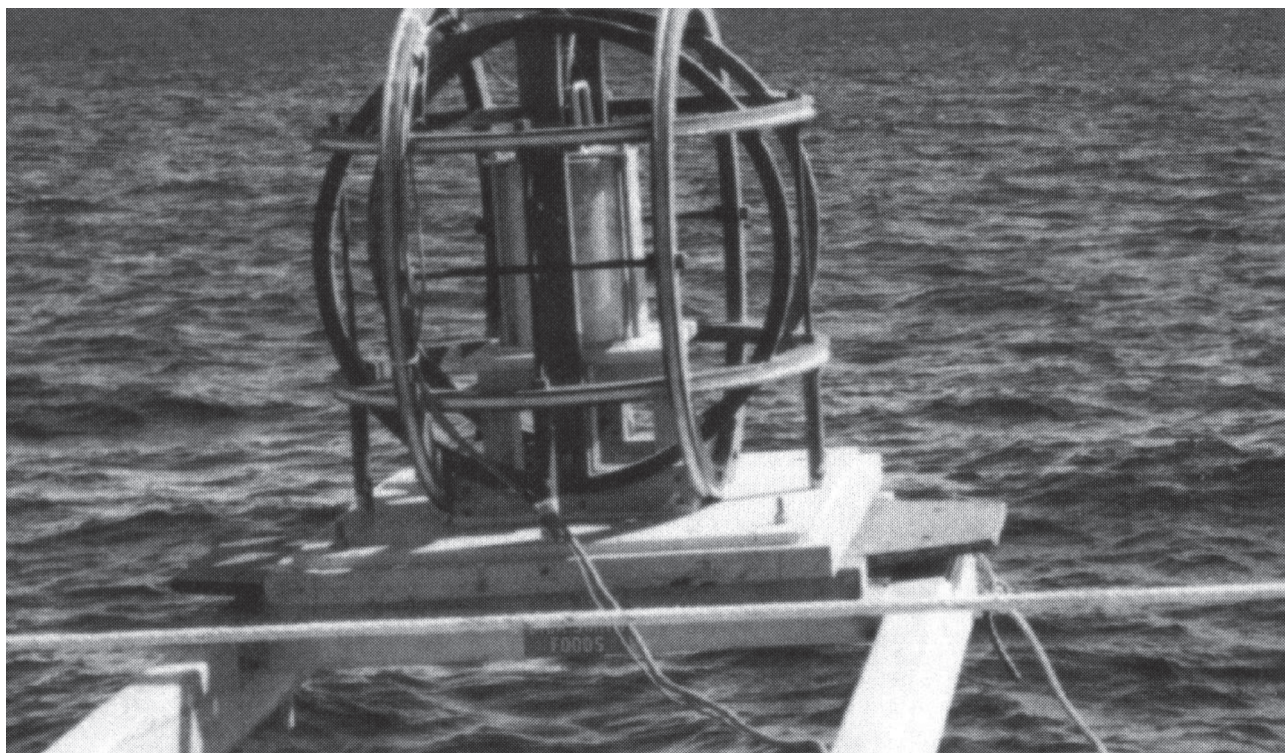


Рис. 5. Магнитометр при определении ЮМП в 2000 г. австралийскими геофизиками в море Дюрвиля [Barton, 2002].

ного поля Земли (АМПЗ) отдельных участков Мирового океана по маршруту следования экспедиции [Арутюнян и др., 2020].

К моменту выхода судна к берегам Антарктиды в распоряжении экспедиции находились:

- морские протонные магнитометры SeaSPY (Marine Magnetics, Canada), АО “Южморгеология”;
- трехкомпонентный феррозондовый магнитометр MVC-2, компонентный магнитометр [Корутенко et al., 1994], разработанный СПбФ ИЗМИРАН;
- судовой компас.

Морские протонные магнитометры SeaSPY предназначены для измерения модуля вектора магнитной индукции (рис. 6). В настоящее время подобная аппаратура широко используется для картирования магнитного поля и его аномалий, источники которых – магнитные объекты, расположенные на дне или в толще горных пород под дном [Соколова и др., 2021]. В экспедиции магнитометрическая съемка выполнялась по методике дифференциальных (двухдатчиковых) гидромагнитных наблюдений, как принято в отечественной геофизической практике [Гордин и др., 1986; Мелихов и др., 1987; Городницкий и др., 2004; Лыгин, 2020; Минлигареев и др., 2020; Kuznetsov et al., 2021], с целью учета вариаций магнитного поля, которые в полярных широтах могут быть особенно интенсивными. Необходимо отметить, что модульные магнитометрические измерения могут лишь косвенно способствовать определению координат магнитного полюса.

Компонентные измерения вектора магнитной индукции проводились с помощью комплекта аппаратуры, разработанной в ИЗМИРАН, который включал 3-датчиковый магнитовариационный комплекс MVC-2 и компонентный магнитометр с датчиками, основанными на магниторезистивном эффекте [Корутенко et al., 1994] (рис. 7).

Векторная магнитометрическая аппаратура находилась в лаборатории, расположенной на корме судна. Датчики были ориентированы вдоль продольной, поперечной и вертикальной осей корабля (рис. 7). Калибровка аппаратуры MVC-2 и проверка ее работоспособности выполнялась на всем протяжении съемки. Перед выходом в рейс в Балтийском море была выполнена калибровка магнитовариационного комплекса MVC-2 на реперных точках. Были получены характеристики, подтверждающие работоспособность комплекса. При подходе к месту работ выполнялись мероприятия по списанию девиации и калибровочные работы по спонантному магнитометра для исключения влияния судна.

В районе ЮМП вектор магнитной индукции направлен практически вертикально, и его горизонтальная компонента близка к нулю. В отсутствии горизонтальной компоненты внешнего



Рис. 6. Гондола морского буксируемого протонного магнитометра SeaSPY.

магнитного поля Земли обычная магнитная стрелка компаса находится в состоянии неустойчивого равновесия и при небольших возбуждениях вращается. В подобных условиях на борту судна магнитная стрелка ориентируется вдоль вектора намагниченности самого судна и описывает его траекторию движения. В силу того, что ОИС “Адмирал Владимирский” перед выходом в рейс и непосредственно перед работами было размагничено и обладало относительно низким собственным магнитным моментом, по мере приближения к району предполагаемого положения ЮМП и в условиях качки не остается магнитных сил, удерживающих магнитную стрелку в стабильном положении, и она вращается хаотично, реагируя на любые наклоны. В условиях отсутствия дополнительных возмущающих магнитных полей момент наиболее неустойчивого положения магнитной стрелки определяет положение ЮМП.

МАГНИТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В МОРЕ ДЮРВИЛЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ЮМП 6–7 АПРЕЛЯ 2020 г.

Поскольку кругосветная экспедиция проходила по установленному графику, то на инструментальное определение положения ЮМП было отведено 48 ч. Исходя из этого, с учетом средней скорости судна в 8 узлов была спроектирована сеть наблюдений, состоящая из 9 рядовых и 5 секущих профилей общей протяженностью 355 пог. км (рис. 8а). Расстояние между рядовыми профилями составило 2 км, секущими – 3.5 км. Положение площади съемки согласовано с ретроспективными определениями ЮМП, его прогнозными оценками положения по моделям IGRF-12,



Рис. 7. Магнитовариационный комплекс MVC-2 разработки ИЗМИРАН в магнитометрической лаборатории на ОИС “Адмирал Владимирский”.

IGRF-13 и WMM, предполагаемыми скоростью и направлением его смещения. В состав объединенной межведомственной геофизической группы ученых по исследованию МПЗ на борту судна входили (рис. 9):

– Солдатов Вадим Алексеевич – научный сотрудник СПбФ ИЗМИРАН;

– Кузякин Михаил Георгиевич – инженер АО “Южморгеология” ГК “Росгеология”;

– Грушников Илья Юрьевич – магистрант физического факультета МГУ.

Команда ОИС “Адмирал Владимирский” обеспечила запись показаний судового магнитометра. Во время съемки 6–7 апреля 2020 г. погодные условия были сложными – скорость ветра превышала 30 м/с, высота волн 7 м – вызывавшие сильную качку судна [Минлигареев и др., 2020; Максимочкин и др., 2020].

Гидромагнитная съемка выполнялась по методике дифференциальных наблюдений. Первый датчик магнитометра буксировался на расстоянии 300 м от кормы судна, второй – 400 м (рис. 10). В связи с плохой погодой на части профилей данные дальнего датчика оказались недостаточного качества.

Для максимально полного использования всех материалов и контроля восстанавливаемых вариаций привлекались данные наиболее близких

магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET, расположенные в Антарктиде: Дюмон-Дюрвиль (Dumont d’Urville (DRV), Франция); Кейси (Casey Station (CSY), Австралия). Их удаление от площади работ составляет около 830 и 2870 км соответственно и расположены они в зоне аврорального электроджета, в то время, как площадь работ – за ее пределами.

Существенное удаление станций от площади работ и различие между ними геомагнитных условий при гидромагнитных съемках в Заполярье обычно не позволяют учитывать вариации по обсерваторным данным напрямую [Лыгин, 2020]. В то же время 6–7 апреля геомагнитный фон на Земле был относительно спокойный. За весь период съемки геомагнитная активность по K_p -индексу не превысила 1 пункта¹. Полная амплитуда вариаций магнитного поля на обсерваториях DRV и CSY составила около 100 нТл при дисперсии значений не более ± 15 нТл². При столь благоприятной геомагнитной обстановке, безусловно, основным источником информации о вариациях магнитного поля стали результаты обработки дифференциальных магнитометрических изме-

¹ http://isgi.unistra.fr/data_plot.php

² <https://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php>

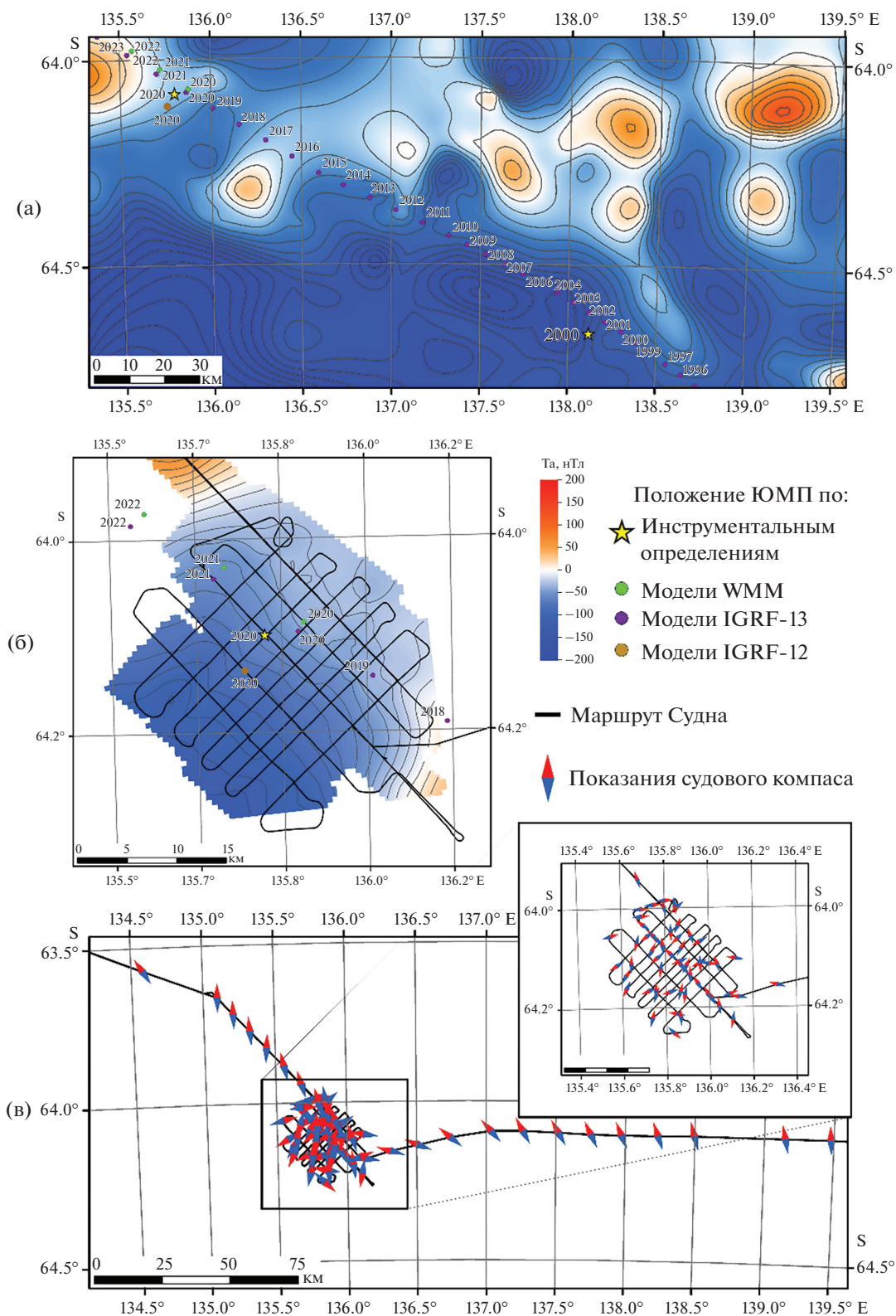


Рис. 8. Параметры магнитного поля в окрестности ЮМП в море Дюрюлья: (а) — положение ЮМП в разные годы на фоне АМПЗ по проекту ADMAP [Golynsky et al., 2018]. Сечение изолиний 20 нТл; (б) — аномальное магнитное поле по материалам экспедиции 2020 г. Сечение изолиний 10 нТл; (в) — магнитное склонение по материалам экспедиции 2020 г.



Рис. 9. Участники объединенной межведомственной геофизической группы по исследованию МПЗ кругосветной антарктической экспедиция ВМФ на ОИС “Адмирал Владимирский” (2019–2020 гг.). На фото слева направо: Солдатов Вадим Алексеевич, Грушников Илья Юрьевич, Кузякин Михаил Георгиевич.

рений, но контролируемые обсерваторными данными.

Окончательная среднеквадратическая погрешность магнитной съемки после ввода всех поправок и линейного уравнивания составила ± 4.4 нТл. Сопоставление полученного АМПЗ с моделью по проекту ADMAP [Golynsky et al., 2018] показывает их высокую сходимость, но с лучшей детализацией по данным морских измерений (рис. 86).

Важными результатами дифференциальной гидромагнитной съемки 2020 г. с точки зрения определения положения ЮМП являются следующие.

Во-первых, установлено, что во время съемки геомагнитный вариационный фон в районе ЮМП был относительно спокойным – на большинстве съемочных профилей магнитные вариации не превышают 30 нТл и имеют линейный ха-

рактер. Это означает, что показания компаса не отягощены помехами от вариаций.

Во-вторых, получена карта АМПЗ на площади расположения ЮМП (рис. 86). В пределах площади отсутствуют существенные положительные магнитные аномалии, которые могли бы повлиять на расчетную оценку положения ЮМП, как это происходило при ранних сухопутных наблюдениях.

Штормовые условия во время съемки сыграли положительную роль с точки зрения анализа отсчетов судового компаса: при регистрации его показаний. Как указывалось выше, в районе полюса наименее устойчивое показание компаса указывает положение ЮМП. Регистрация отсчетов судового компаса велась при приближении к площади детальной съемки и при удалении от нее, а также на всем протяжении работ на ней, так, чтобы обеспечить не менее 1–2 измерений на каждом профиле. Всего наблюдений с компасом



Рис. 10. Работы с протонным морским магнитометром в море Дюрвиля по определению ЮМП.

на площади работ – более 50. На рис. 8в хорошо видно, как при приближении к району ЮМП изменяется направление стрелки компаса (склонения) и все больше коррелирует с направлением движения судна. Это свидетельствует о том, что горизонтальная компонента магнитного поля Земли принимает значения близкие к нулевым, что доказывает правильность выбора участка исследования, так как на магнитных полюсах наиболее значима вертикальная компонента (рис. 8в). По показаниям компаса, скорректированным за девиационную компоненту судна, определено положение ЮМП. Неопределенность точки ЮМП, в первую очередь, обусловлена детальностью сети наблюдений и неравномерностью компасных наблюдений. Размер неопределенности можно оценить окружностью с радиусом примерно 5 км.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность всем, кто принимал участие в подготовке специалистов, разработке проекта методики съемки, обработке результатов измерений, доставке оборудования для экспедиции (в том числе и запасных частей для магнитометров на российскую антарктическую станцию “Беллинсгаузен”), оперативно организовывал передачу измерительной информации во время похода, обеспечивал связь и координацию по маршруту следования ОИС “Адмирал Владимирский”, кто осуществлял поддержку и проведение научных консультаций:

1. Руководителю экспедиции ОИС “Адмирал Владимирский”, заместителю начальника Управления навигации и океанографии МО РФ Осипову Олегу Дмитриевичу.

2. Директору Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Росгидромета (ФГБУ “ИПГ”, г. Москва) докт. физ.-мат. наук

Репину Андрею Юрьевичу, сотрудникам института.

3. Сотрудникам физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова: заведующему кафедрой физики Земли профессору, докт. физ.-мат. наук Смирнову Владимиру Борисовичу, профессору кафедры докт. физ.-мат. наук Максимочкину Валерию Ивановичу.

4. Старшему научному сотруднику отделения геофизики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова канд. геол.-мин. наук Соколовой Татьяне Борисовне и студентам Шкляруку Алексею Дмитриевичу, Вишнякову Дмитрию Дмитриевичу.

5. Директору Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН) докт. физ.-мат. наук Копытенко Юрию Анатольевичу, заведующему лабораторией морских геомагнитных исследований канд. физ.-мат. наук Меркурьеву Сергею Александровичу и научным сотрудникам лаборатории.

6. Управляющему директору АО “Южморгеология”, г. Геленджик Красинскому Егору Михайловичу (Российский геологический холдинг “Росгеология”), директору экспедиции по гравимагнитным работам Григорьеву Евгению Константиновичу.

7. Руководителю Российской антарктической экспедиции (РАЭ) канд. физ.-мат. наук, Клепикову Александру Вячеславовичу, руководителю отдела геофизики канд. тех. наук Калишину Алексею Сергеевичу Арктического и Антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (ФГБУ “АНИИ”, г. Санкт-Петербург).



Рис. 11. ОИС “Адмирал Владимирский” на параде в день ВМФ на внешнем рейде г. Кронштадт, 26.07.2020 г.

8. Начальнику Гидрометеорологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации Удришу Владимиру Викторовичу и личному составу службы, принимавшему участие в экспедиции.

9. Сотруднику Управления навигации и океанографии МО РФ канд. тех. наук Процаенко Сергею Владимировичу,

Фотографии с ОИС “Адмирал Владимирский” предоставлены членами экспедиции, пресс-службой РГО и РИА Новости.

Информация о геомагнитных индексах представлена институтами, входящими в Международную службу геомагнитных индексов (International Service of Geomagnetic Indices, ISGI) на основе данных, собранных в магнитных обсерваториях. Авторы благодарят сеть ИНТЕРМАГНЕТ² (intermag-net.org) и ISGI (isgi.unistra.fr).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Команда ОИС “Адмирал Владимирский” и объединенная межведомственная геофизическая группа российских ученых по исследованию магнитного поля Земли спустя 20 лет после последнего инструментального определения магнитно-

го полюса провела работы в районе нахождения Южного магнитного полюса в море Дюрвиля вблизи Земли Адели Антарктиды.

Впервые в мировой практике для определения положения ЮМП в море комплексно были использованы:

- модульные протонные дифференциальные магнитометры;
- векторные трехкомпонентные феррозондовые магнитометры;
- судовой компас;
- магнитные обсерватории, учитывающие вариации МПЗ.

В настоящее время детальная обработка компонентных магнитометрических наблюдений еще ведется, но уже по имеющимся материалам положение Южного магнитного полюса можно считать установленным.

Погрешность определения положения ЮМП определяется детальностью сети наблюдений и составляет ± 5 км. Удаление от положения ЮМП по модели WMM составило 4.5 км, по модели IGRF-13 – 3.5 км. Перемещение ЮМП относительно предыдущего инструментального опре-

деления в 2000 г. [Barton, 2002] составляет около 135 км, средняя скорость 6.5 км/год. Примерно за такой же временной период (с 1983 по 2000 гг.) ЮМП сместился на 115 км при средней скорости 6.8 км/год. Таким образом, можно отметить выдержанные значения скорости и направление перемещения на протяжении без малого 40 лет. В отличие от Северного магнитного полюса, Южный — в 21 веке ведет себя более стабильно и дрейфует медленнее, чем в 20 в. Данные факты находятся в согласии с выводами, сделанными в работе [Manda, Dormy, 2003].

Принимая во внимание важность и глобальность подобных исследований, целесообразно:

- определить перспективы объединения возможностей межотраслевых инструментальных измерений и мониторинга МПЗ в различных регионах Мирового океана на регулярной основе с целью улучшения магнитометрической изученности акватории нашей планеты;

- продолжить развитие методов математической обработки параметров аномального МПЗ, в том числе ретроспективных съемок с использованием технологий нейронных сетей;

- на основании полученного опыта разработать методику определения магнитного полюса Земли в море, включая использование перспективных морских МВС;

- в связи с ускорением движения магнитных полюсов достигнуть договоренностей по регулярному инструментальному контролю магнитных полюсов для уточнения мировых моделей в рамках Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии IAGA;

- внести в международные базы данных инструментальное определение ЮМП на ОИС “Адмирал Владимирский” (1983–1984) гг. и (2019–2020) гг. (рис. 11).

Инструментальное определение Южного магнитного полюса Земли является крупным мировым достижением за последние 20 лет, серьезным вкладом российских ученых в мировую копилку достижений в области познания основополагающих геофизических процессов, происходящих на нашей планете, важным для решения ряда фундаментальных и прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арутюнян Д.А., Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Булычев А.А., Грушников И.Ю., Шклярук А.Д., Вишняков Д.Д., Минлигареев В.Т., Панышин Е.А. Исследование магнитного поля Земли в кругосветной антарктической экспедиции ВМФ на ОИС “Адмирал Владимирский”. Труды IX Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)”. Т. I (III). Т3. Тверь: ПолиПРЕСС. 2020. С. 494–498.

Беллинсгаузен Ф.Ф. Двукратные изыскания в Южном Ледовитом океане и плавание вокруг света / Сост. и подг. Г.В. Карпюк, Е.И. Харитонова; авт. предисловия В.С. Корякин. М.: Дрофа. 2008. 990 с. ISBN 978-5-358-02961-3.

Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магнетометрия. М.: Недра. 1986. 232 с.

Городницкий А.М., Филин А.М., Малютин Ю.Д. Морская магнитная градиентная съемка. М.: ВНИРО. 2004. 140 с.

Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. М.: МЦНМО. 2003. 48 с.

Золотайкин Б.М. На всю оставшуюся жизнь // Навигация и гидрография. 2007. № 25. С. 120–128.

Лыгин И.В. Преимущества морской дифференциальной магниторазведки в Арктике. Международная научно-практическая конференция “Морские исследования и образование” MARESEDU. 2020 (устное сообщение).

Магниторазведка: учебное пособие / А.А. Булычев, М.Г. Попов, Л. А. Золотая и др. 2016. Тверь: Полипресс. 135 с.

Максимочкин В.И., Грушников И.Ю., Минлигареев В.Т. Измерение координат Южного магнитного полюса Земли в кругосветной экспедиции ОИС ВМФ “Адмирал Владимирский” // Советский физик. 2020. № 5(146). С. 19–27.

Мелихов В.Р., Булычев А.А., Шамаро А.М. Частотный способ решения задачи разделения стационарной и переменной составляющих геомагнитного поля при гидромагнитных градиентометрических съемках. Электромагнитные исследования. М.: ИЗМИРАН. 1987. С. 97–109.

Минлигареев В.Т., Осипов О.Д., Арутюнян Д.А. и др. Исследование магнитного поля Мирового океана и Южного магнитного полюса Земли в кругосветной антарктической экспедиции ВМФ на ОИС “Адмирал Владимирский” 2019–2020 гг. Сборник материалов 5-й Всероссийской научно-практической конференции “Актуальные проблемы развития и эксплуатации морской техники” 29 сентября–3 октября 2020 г. Вып. 5(28). Севастополь: ЧВВМУ им. П.С. Нахимова. 2020. С. 128–139.

Осипов О.Д., Минлигареев В.Т., Копытенко Ю.А. и др. Что нового узнали ученые о дрейфе магнитного полюса Земли и магнитного поля Мирового океана. Русское географическое общество, информационный портал. 2020. Сайт. 08.06.2020. <https://www.rgo.ru/ru/article/chto-novogo-uznali-uchyonye-o-dreyfe-magnitnogo-polyusa-zemli-i-magnitnogo-polya-mirovogo>

Соколова Т.Б., Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Токарев М.Ю., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А. Современные гравиразведка и магниторазведка при решении инженерно-геологических задач на шельфе (обзор и опыт применения) // Геофизика. Специальный выпуск. 2021. С. 54–62.

Alken P., Thébaud E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. 2021. V. 73. P. 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>

Barton C. Survey Tracks Current Position of South Magnetic pole // EOS. 2002. V. 83(27). P. 291.

Chulliat A., Brown W., Alken P. et al. The US/UK World Magnetic Model for 2020–2025: Technical Report // National Centers for Environmental Information. NOAA. Silver Spring. Md. 2020.
<https://doi.org/10.25923/ytk1-yx35>

Golynsky A.V., Ferraccioli F., Hong J.K. et al. New Magnetic Anomaly Map of the Antarctic // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. P. 6437–6449.
<https://doi.org/10.1029/2018GL078153>

Kopytenko Y.A., Kopytenko E.A., Amosov L.G. et al. Magneto-variation complex MVC-2. Proc. of VI Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments. Data Acquisition and Processing. Dourbes, Belgium. 1994.

Kuznetsov K., Lygin I., Bulychev A., Kiryukhina E. Analysis of opportunities spectral method for processing hydromagnetic survey // Engineering and Mining Geophysics. 2021. Gelendzhik. Russia. 2021.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152047>

Mandea M., Dormy E. Asymmetric behavior of magnetic dip poles // Earth Planets Space. 2003. V. 55. P. 153–157. NCEI Geomagnetic Modeling Team and British Geological Survey. 2019: World Magnetic Model 2020. NOAA National Centers for Environmental Information. 2020.
<https://doi.org/10.25921/11v3-da71>

Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. P. 79 (27 May 2015).

Instrumental Determination of the Earth's South Magnetic Pole Position during the Round-the-World Antarctic Expedition on Board the Russian Navy ORV Admiral Vladimírsky

I. V. Lygin^{a, *}, D. A. Arutyunyan^{a, **}, A. A. Bulychev^a,
 K. M. Kuznetsov^a, and V. T. Minligareev^b

^aLomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

^bFedorov Institute of Applied Geophysics (FGBU "IPG"), Moscow, Russia

*E-mail: ivanlygin@mail.ru

**E-mail: david-20.97@mail.ru

The round-the-world Antarctic expedition of the Russian Navy that took place from December 2019 to June 2020 on board the Russian Navy oceanographic research vessel (ORV) Admiral Vladimírsky was supported by the Russian Geographical Society and was dedicated to the 200th anniversary of the discovery of Antarctica and the 250th birthday anniversary of Admiral Ivan Kruzenshtern. One of the expedition's main objectives was to instrumentally determine the position of the South Magnetic Pole (SMP) whose latest location had been measured more than twenty years before. Planning of magnetometric research, its monitoring and processing of obtained data were carried out by members of the Chair of Geophysical Methods of the Earth's Crust Study of the MSU Department of Geology and the Fedorov Institute of Applied Geophysics. Based on a set of instrumental determinations (modular proton-precession differential magnetometers, vector three-component flux-gate magnetometers, the ship compass), the SMP position was measured to a precision of ± 5 km. Proceeding from the 1980 and 2000 instrumental SMP determinations, it is proven that over the past 40 years, the SMP has been shifting at a consistent velocity in the same direction.

Keywords: Earth's magnetic field, Antarctica, South Magnetic Pole, shift velocity, instrumental determination, round-the-world Antarctic expedition, international models, oceanographic research vessel, proton-precession magnetometer, hydromagnetic survey, three-component flux-gate magnetometer, compass, magnetic declination, magnetic induction