

Куда бежит МАГНИТНЫЙ ПОЛЮС?

Куда указывает стрелка компаса? Ответ на этот вопрос даст любой: конечно, на Северный полюс! Более осведомленный уточнит: стрелка показывает направление не на географический полюс Земли, а на магнитный, и что в реальности они не совпадают. Самый знающий добавит, что магнитный полюс вообще не имеет постоянной «прописки» на географической карте. Судя же по результатам последних исследований, полюс не только имеет природную склонность к «бродяжничеству», но в своих блужданиях по поверхности планеты иногда способен перемещаться со сверхзвуковой скоростью!

Ключевые слова: магнитный полюс, скорость движения полюсов, геомагнитная вариация
Key words: magnetic pole, velocity of the pole displacement, geomagnetic variation



СЕМАКОВ Николай Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН, доцент Новосибирского национального исследовательского государственного университета. Автор и соавтор 40 научных работ

КОВАЛЕВ Александр Анатольевич – инженер-исследователь магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН. Автор и соавтор 5 научных работ

ПАВЛОВ Анатолий Федорович – инженер-исследователь магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН. Автор и соавтор 47 научных работ

ФЕДОТОВА Ольга Ивановна – инженер-исследователь магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН. Автор и соавтор 15 научных работ

Земля окружена гигантским пузырем из магнитных полей, называемым магнитосферой. По мере ее продвижения в пространстве перед ней формируется сложная система заряженных частиц, источником которых является Солнце или магнитные структуры. Особый интерес представляет так называемая «область форшока», предшествующая головной ударной волне: ее изучение позволит понять, как энергия из окружающего пространства преодолевает этот барьер, проникая в магнитосферу. *Credit: NASA/GSFC*

© Н. Н. Семаков, А. А. Ковалев, А. Ф. Павлов, О. И. Федотова, 2016

Знакомство человечества с явлением земного магнетизма, судя по письменным китайским источникам, случилось не позднее 2–3 в. до н.э. Те же китайцы, несмотря на несовершенство первых компасов, заметили и отклонение магнитной стрелки от направления на Полярную звезду, т.е. на географический полюс. В Европе с этим феноменом познакомились в эпоху Великих географических открытий, не позднее середины XV в., о чем свидетельствуют навигационные инструменты и географические карты того времени (Дьяченко, 2003).

О смещении географического положения магнитных полюсов на поверхности планеты ученые заговорили с начала прошлого века после повторных, с интервалом в год, измерений координат истинного Северного магнитного полюса. С тех пор в научной печати достаточно регулярно появляется информация об этих «странствиях», особенно Северного магнитного полюса, который сейчас уверенно движется от островов Канадского арктического архипелага к Сибири. Раньше он перемещался со скоростью около 10 км в год, в последние же годы эта скорость возросла (Newitt *et al.*, 2009).

Но это касается изменения географического положения полюсов год от года, а насколько стабильно они ведут себя в масштабе реального времени – в течение секунд, минут, суток? Судя по наблюдениям путешественников, полярных мореплавателей и авиаторов, магнитная стрелка иногда вертится «как бешеная», поэтому устойчивость положения магнитных полюсов давно ставилась под сомнение. Однако до сих пор ученые не пытались оценить ее количественно.

В магнитных обсерваториях мира сегодня ведется непрерывная запись всех компонентов вектора магнитной индукции, которые применяют для расчета среднегодовых значений параметров магнитного поля и создания карт земного магнетизма, использующихся для выявления аномалий при проведении магнито-разведочных работ. Эти же записи позволяют изучить и поведение магнитного полюса на временных интервалах меньше года.

Что же происходит с полюсом в спокойный период и во время магнитных бурь? Насколько сильно такая буря может «раскачать» магнитный диполь в центре Земли? И, наконец, насколько большую скорость способен в реальности развивать магнитный полюс?

Ответы на эти вопросы имеют не только научный, но и практический интерес. Ведь вместе со смещением магнитного полюса и расширением области его «блуждания» не только меняется область полярных сияний, но и возрастает риск возникновения аварийных ситуаций в протяженных линиях электропередач, помех в работе спутниковых навигационных систем и коротковолновой радиосвязи.

В СЕТИ ИНТЕРМАГНЕТА

Первые измерения магнитного склонения в России были проведены в 1556 г., во времена царствования Иоанна Грозного, в Архангельске, Холмогорах, в устье Печоры, на Кольском полуострове, о. Вайгач и Новой Земле. Измерение параметров магнитного поля и обновление карт магнитного склонения было настолько важным для мореплавания и других практических целей, что магнитной съемкой занимались участники многих экспедиций, мореплаватели и известные путешественники. Судя по «Каталогу магнитных измерений в СССР и сопредельных странах с 1556 по 1926 год» (1929), в их число входили такие мировые «звезды» как Амундсен, Баренц, Беринг, Борро, Врангель, Зеберг, Келль, Колчак, Кук, Крузенштерн, Седов и многие др.

Первые в мире обсерватории для исследования изменений параметров земного магнетизма были организованы в 1830-е гг., в том числе на Урале и в Сибири (в Нерчинске, Кольвани и Барнауле). К сожалению, после отмены крепостного права сибирская горнорудная промышленность, а с ней и сибирская магнитометрия, пришли в упадок. Мощными стимулами к организации новых обсерваторий, а также магнитных измерений на полярных станциях, так называемых пунктах векового хода, где производятся повторные определения элементов земного магнетизма через определенные промежутки времени, а также на дрейфующем льду, стали широкомасштабные комплексные исследования в рамках Второго международного полярного года (1932–1933) и Международного геофизического года (1957–1958). На сегодняшний день в нашей стране работает десять магнитных обсерваторий, входящих в мировую сеть магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ. Наиболее близко к магнитной обсерватории «Новосибирск» расположены обсерватории «Арти» (Свердловская обл.), «Диксон» (Красноярский край), «Алма-Ата» (Казахстан) и «Иркутск» (Иркутская обл.).



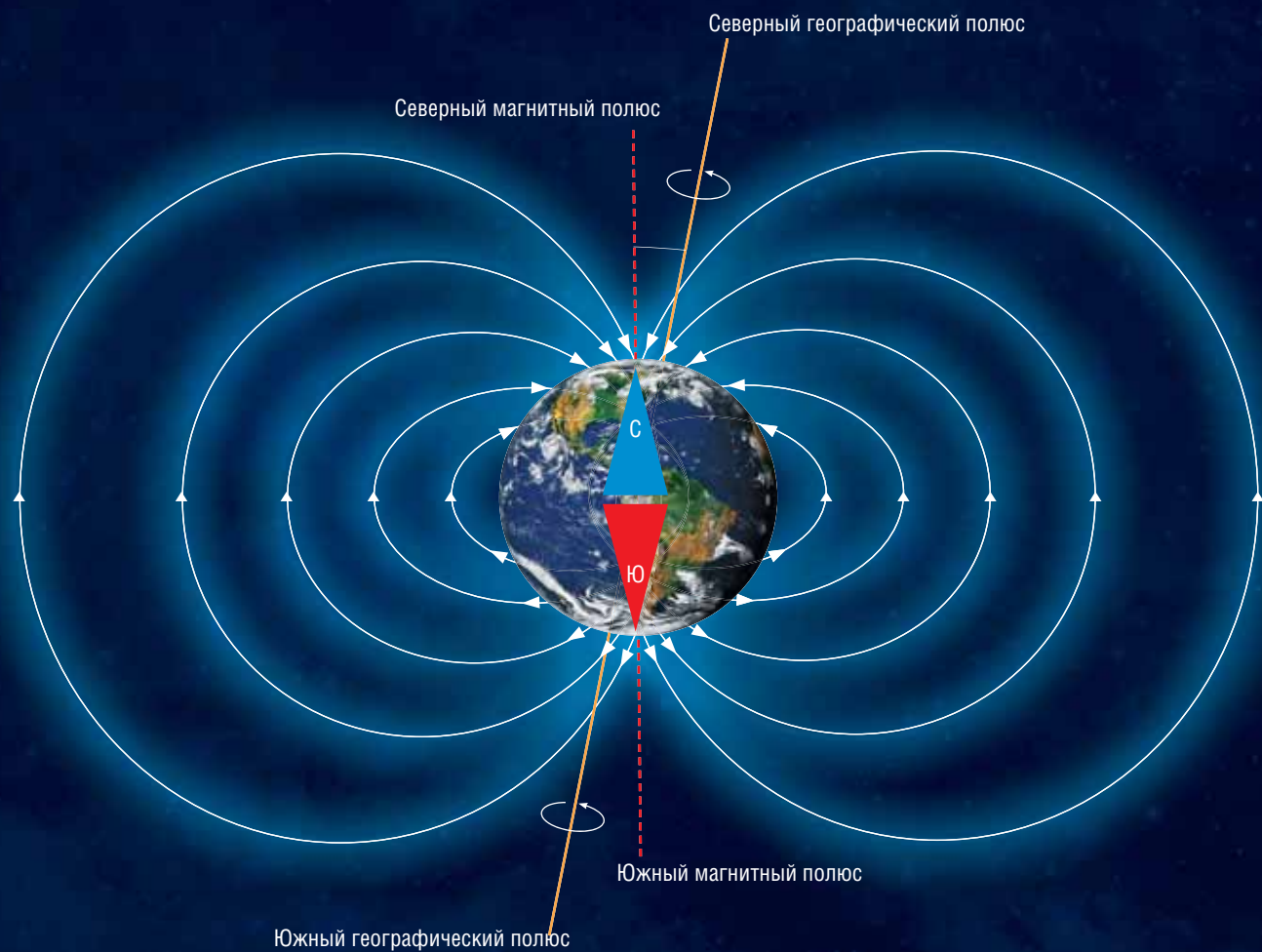
Художник Ф. Э. Чёрч, создавший в 1865 г. картину «Северное сияние», был свидетелем этого явления 23 декабря 1864 г. на о. Маунт-Дезерт (штат Мэн). В качестве «сцены» он использовал рисунок своего друга и полярного исследователя А. И. Хейса. Холст, масло. 142,3 x 212,2 см Смитсоновский музей американского искусства (Вашингтон)

За неземной, в прямом смысле этого слова, красотой полярного сияния стоит сильнейшее возмущение магнитного поля, сбивающее с толку компасы. «На пазорях матка дурит», – говорили в таких случаях русские поморы, связывая беспокойное поведение стрелки компаса («матки») с радужными небесными сполохами

Сквозь магнитные бури

К угловым элементам земного магнетизма относятся *магнитное склонение* (D), равное углу между северным направлением истинного (географического) и магнитного меридианов, и *магнитное наклонение* (I) – угол наклона магнитной стрелки по отношению к горизонту. Склонение характеризует величину «расхождения» между географическим и магнитным азимутами, наклонение – удаленность наблюдателя от магнитного полюса. При значении I = 90° (когда магнитная стрелка располагается вертикально) наблюдатель находится в точке истинного магнитного полюса. В остальных случаях по значениям D и I можно рассчитать координаты *виртуального магнитного полюса* (ВМП), который не обязательно совпадает с истинным из-за того, что представление глобального магнитного поля Земли в виде единого диполя все-таки является неоправданно упрощенным при его детальном исследовании.

Одним из самых, на наш взгляд, эффективных и наглядных способов исследования поведения полюсов является преобразование значений элементов земного магнетизма в более «интегральные» и удобные для сопоставления характеристики – мгновенные координаты магнитных полюсов и локальную магнитную постоянную (Bauer, 1914; Kuznetsov *et al.*, 1990; 1997). Преимущество этого преобразования в том, что оно не тре-



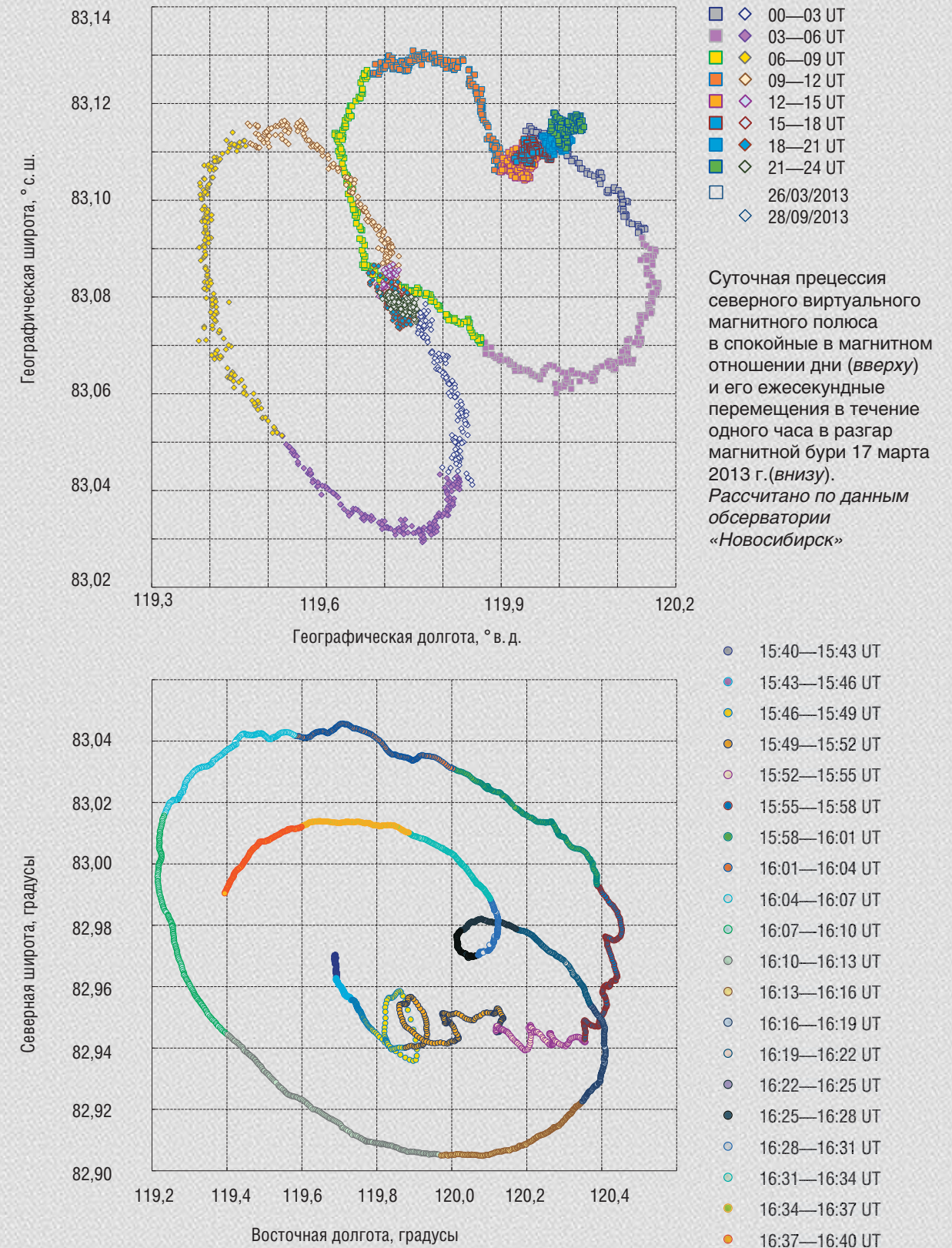
На схеме магнитного поля Земли отчетливо видно, что магнитные полюса не совпадают с географическими. По: (Peter Reid, The University of Edinburgh, 2011)

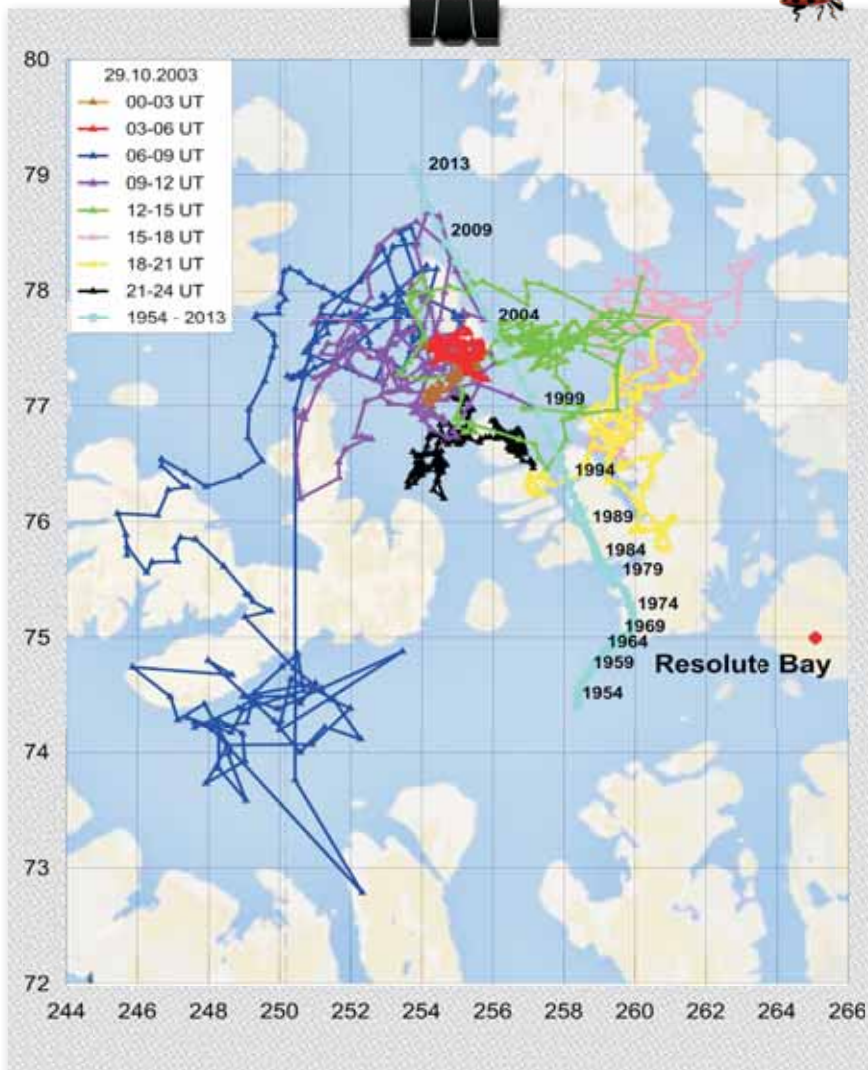
бует никаких предположений об истинных источниках наблюдаемого магнитного поля, но при этом позволяет увидеть, в частности, насколько магнитные полюса могут «разбегаться и разгоняться» на коротких (меньше года) временных интервалах.

Оказалось, что даже в дни спокойного состояния магнитного поля в периоды осеннего или весеннего равноденствия виртуальный северный магнитный полюс может вообще реально не побывать в точке своего рассчитанного «среднесуточного» положения! Дело в том, что в течение светового дня полюс не остается в неподвижности, а его «траектория» напоминает овал. Например, в спокойные дни по данным магнитной обсерватории «Ключи» (Новосибирск) северный магнитный полюс описывает по часовой стрелке петлю, вытянутую примерно на 10 км в направлении с юго-востока на северо-запад.

Во время магнитной бури колебания магнитной оси Земли происходят намного сильнее, но их также нельзя назвать хаотичными. Так, 17 марта 2013 г. всего за 20-минутный интервал магнитный полюс «пробежал» по эллипсу размером более 20 км, выписывая по пути мелкие вензеля с периодом в несколько секунд. Интересно, что в отдельные периоды возмущения магнитного поля полюс может менять направление своего движения, перемещаясь против часовой стрелки.

Одна из самых мощных магнитных бурь произошла 29–31 октября 2003 г. О степени «расшатывания» магнитного диполя ядра Земли во время этой бури можно судить по траектории движения северного магнитного полюса, который совершил настоящий «войж» по окрестным островам, неоднократно отклоняясь в разные стороны на сотни километров от своей «нормальной», среднегодовой позиции. Для сравнения заметим,





Масштабы «блуждания» северного магнитного полюса во время мощнейшей магнитной бури 29 октября 2003 г. достигали семисот километров, что превышает среднюю длину пути, который полюс «прошел» за последние 60 лет. Рассчитано по данным магнитной обсерватории Резольют-Бей (Канада)

их дуги большого круга, которая и является минимальной оценкой пути, пройденного полюсом. Именно минимальной – потому что эта дуга представляет собой кратчайший путь по сфере от одной точки до другой. А общая траектория объекта нашего исследования на поверхности земного шара как во время магнитных бурь, так и в период «покоя» представляет собой не просто дугу, а набор «петель» различной формы и размеров.

Для вычисления скоростей виртуальных магнитных полюсов мы выбрали 17 марта 2013 г.: в течение этих суток наблюдалось как спокойное, так и возмущенное состояние магнитного поля. Для каждой из 1440 минут этих суток на основе минутных значений характеристик земного магнетизма был рассчитан путь, пройденный виртуальным магнитным полюсом, и определена скорость его движения.

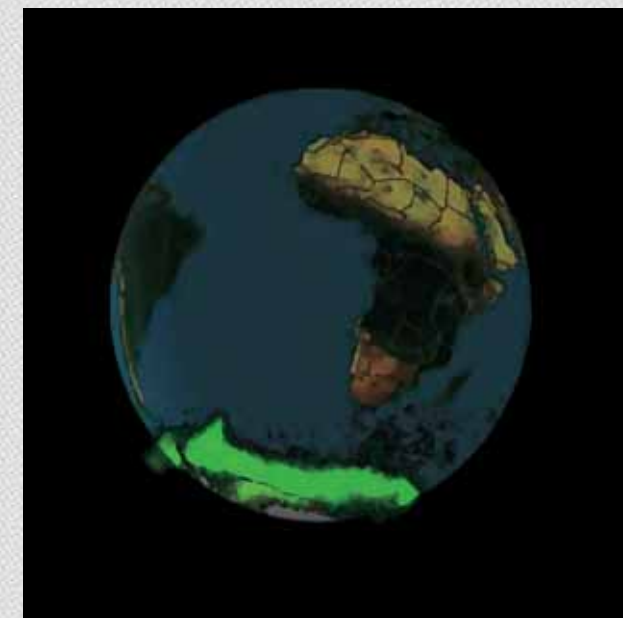
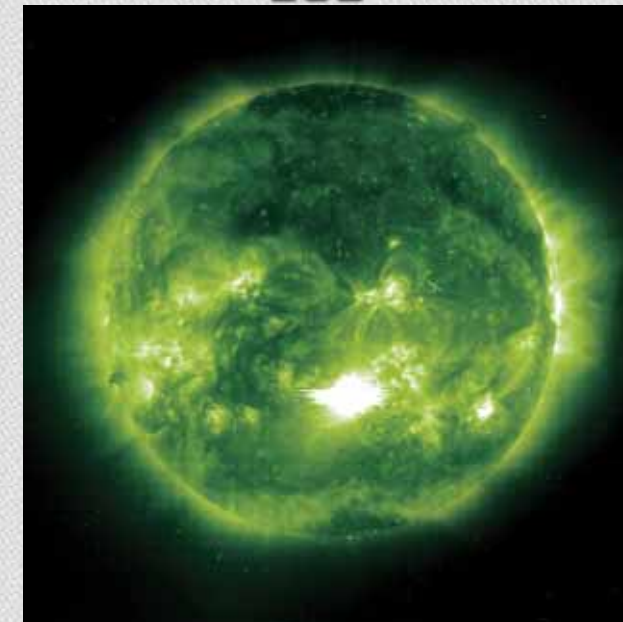
Результаты вычислений впечатлили даже опытных магнитологов: оказалось, что в отдельные моменты магнитные полюса могут перемещаться не только со скоростью автомобиля, но и реактивного самолета, превышающего скорость звука!

что путь, пройденный северным магнитным полюсом, рассчитанный по среднегодовым значениям склонения и наклонения на основе данных канадской обсерватории Резольют-Бей, за последние 40 лет представляет собой линию длиной не более 500 км.

Со скоростью звука

Сегодня в мире работает более ста магнитных обсерваторий, данные измерений которых сохраняются в единой базе ИНТЕРМАГНЕТ (InteRMagNet – International Real Magnetic Net). И хотя в ней обычно представлены данные с минутным интервалом, большинство магнитных обсерваторий измеряют значения элементов земного магнетизма ежесекундно. Но даже расчеты по средним минутным значениям на основе данных обсерваторий, расположенных на разных широтах земного шара, позволяют оценить закономерности и скорости движения магнитных полюсов.

Прежде чем рассчитать скорость движения полюса за определенный период времени, требуется преобразовать величины склонения и наклонения в координаты соседних географических точек, которые за это время посещал магнитный полюс, а затем оценить общую длину соединяющей



Третья по мощности из известных солнечных вспышек, когда-либо наблюдавшихся в рентгеновском диапазоне, была зафиксирована 28 октября 2003 г. (вверху). Корональному выбросу массы, направленному почти прямо на Землю, предшествовал выброс наэлектризованного газа. Рекордная вспышка стала причиной необычных полярных сияний в малонаселенных районах Антарктики (внизу), поэтому лишь немногим счастливицам удалось наблюдать это захватывающее зрелище. Credit: NASA/ESA

ЗДЕСЬ БЫЛ ПОЛЮС

Научное исследование земного магнетизма началось с работы английского врача и исследователя Вильяма Гильберта, который в 1600 г. издал труд «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле», где высказано предположение, что наша планета представляет собой большой дипольный магнит. Идея магнитного диполя, расположенного в центре земного шара, лежит в основе современной симметричной модели магнитного поля Земли. При этом два магнитных полюса, северный и южный, являются точками, в которых продолжение оси центрального диполя пересекает земную поверхность. Использование этой модели для расчета координат магнитных полюсов является обычным в палеомагнетизме (Merrill et al., 1998). Поэтому магнитологи издавна используют термин «виртуальный магнитный полюс» (ВМП) в значении «фактический» или «расчетный». Географические координаты этого полюса (широта Φ и долгота Δ) рассчитывают, исходя из фактических значений магнитного склонения (Δ) и магнитного наклонения (I), измеренных в определенный момент времени в точке с географической широтой φ и долготой λ :

$$\sin \Phi = \sin \varphi \times \cos \theta + \cos \varphi \times \sin \theta \times \cos \Delta,$$

$$\sin(\Delta - \lambda) = \sin \theta \times \sin \Delta / \cos \Phi, \text{ где } \text{ctg} \theta = \frac{1}{2} \text{tg} I.$$

Согласно этим формулам, два разноименных магнитных полюса находятся на расстоянии 180° дуги большого круга друг от друга. По мере приближения магнитного наклонения к 90° можно все более уверенно говорить о близости рассчитанной точки ВМП к истинному северному магнитному полюсу.

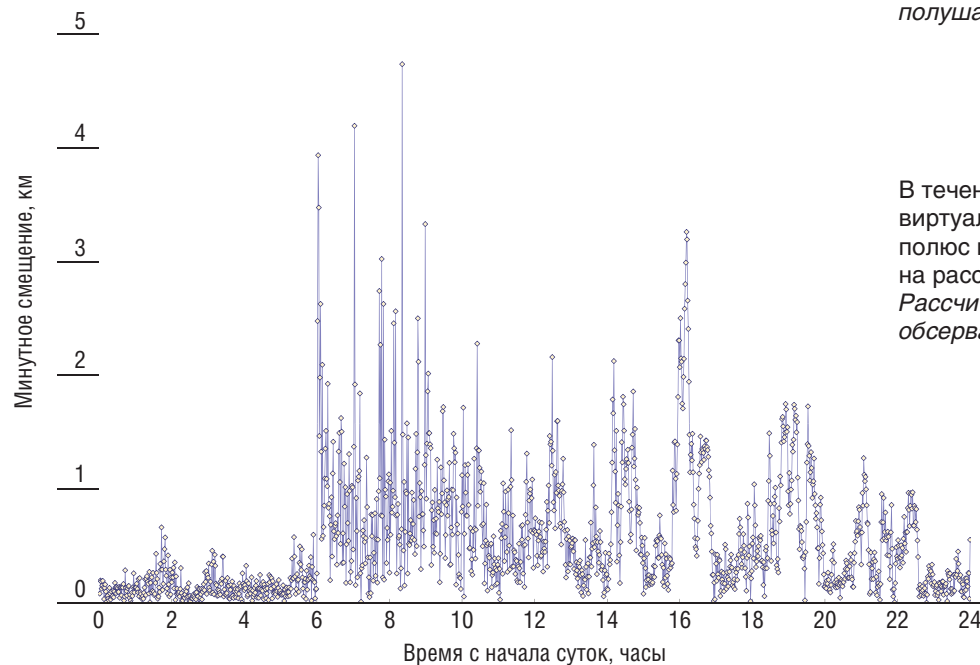
Как уже говорилось выше, по координатам Φ и Δ можно одновременно рассчитать положение и северного, и южного (противоположного) виртуальных магнитных полюсов. Однако в отношении истинного магнитного полюса точность такого определения координат вызывает сомнения в случае, если расчеты основываются на данных, полученных на очень большом удалении от самого этого полюса. В действительности из-за асимметрии магнитного поля Земли истинный северный и южный магнитные полюса вовсе не являются географически противоположными точками. Поэтому противоположные виртуальные магнитные полюсы, положение которых рассчитано по данным разных обсерваторий, часто являются на самом деле полюсами двух центральных магнитных диполей разной ориентации, а наиболее достоверную информацию о положении истинных магнитных полюсов в настоящее время можно получить только в Арктике и у берегов Антарктиды

Обсерватория	Код	Широта ϕ	Долгота λ	Δ , km	L , km	V_a , км/ч	V_x , км/ч
Резольют-Бей	RES	+74,7	265,1	275	3869	161,4	3922,8
Новосибирск	NVS	+55,0	82,9	41	804	33,5	284,3
Иркутск	IRT	+52,2	104,5	39	658	27,4	211,3
Алибаг	ABG	+18,6	72,9	15	132	5,5	77,4
Аддис-Абеба	AAE	+9,0	38,8	12	131	5,6	75,0
Вассорас	VSS	-22,4	316,4	43	400	16,7	279,2
Кейси	CSY	-66,3	110,5	184	3061	127,6	1796,6
Моусон	MAW	-67,6	62,9	264	6150	256,4	3702,4

L – пройденный путь, Δ – максимальный разброс положений вдоль дуги большого круга, V_a – средняя скорость перемещения, V_x – максимальная скорость перемещения. Положительное значение ϕ соответствует северной широте, отрицательное – южной

Интересно, что полученные оценки скоростей зависели от географического положения обсерваторий, данные которых были использованы для расчетов. Так, по данным среднеширотных и низкоширотных обсерваторий скорости движения виртуальных магнитных полюсов (как средние, так и максимальные) оказались значительно меньше, чем по данным обсерваторий, расположенных в Арктике и Антарктике. Кстати сказать, степень удаленности обсерватории от истинного магнитного полюса аналогично влияет и на суточный разброс положения виртуального магнитного полюса. Эти данные также свидетельствуют в пользу того, что наиболее точную информацию о параметрах движения истинных магнитных полюсов можно получить именно в тех районах, где эти полюсы реально «блуждают».

Параметры движения северного и южного виртуальных магнитных полюсов, так же как и разброс их пространственного положения за суточный период, рассчитанные по данным разных магнитных обсерваторий, существенно зависят от удаленности обсерватории от истинного магнитного полюса. Наиболее точную информацию о параметрах движения истинных магнитных полюсов можно получить в районах, наиболее приближенных к месту их реальной «дислокации». *Рассчитано по данным магнитных обсерваторий в соответствующем полушарии на 17 марта 2013 г.*



В течение суток 17 марта 2013 г. виртуальный северный магнитный полюс мог за минуту смещаться на расстояние свыше 4,5 км. *Рассчитано по данным обсерватории «Новосибирск»*



**КОММЕНТАРИЙ
ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**

Авторы этой статьи – известные специалисты в области изучения магнитного поля Земли, много лет занимающиеся его мониторингом. Они предложили и реально осуществляют этот мониторинг путем отслеживания ежесекундного положения виртуального магнитного полюса (ВМП) наряду с измерением традиционных параметров – магнитного склонения, наклона и интенсивности в посто-

янной точке измерений в магнитной обсерватории «Новосибирск», которая входит в международную сеть данных «ИНТЕРМАГNET». Иллюстрации к статье наглядно показывают петлеобразные «блуждания» северного ВМП в различные временные интервалы: за сутки в спокойный период (за 25.03.2013 и 28.09.2013), за один час во время магнитной бури (17.03.2013), за сутки с трехчасовым интервалом во время сильнейшей магнитной бури (29.10.2003). А график смещения его положения за 17.03.2013 свидетельствует, что скорость движения полюса в минутном интервале может достигать 240 км/ч. Эти иллюстрации наглядно показывают очень большие вариации направления и скорости перемещения виртуального магнитного полюса, но, к сожалению, не дают им убедительного физического толкования, хотя, по моему мнению, они связаны с неустойчивостью и сильной изменчивостью ионосферы (внешней ионизированной и разряженной части земной атмосферы), особенно во время магнитных бурь.

Еще один важный вопрос, лишь затронутый в статье, – возможность мониторинга и предсказания момента приближения инверсии магнитного поля. Во время инверсии (длительностью до несколько тысяч лет), как это наблюдалось сотни раз за последние 500 млн лет, интенсивность магнитного поля ослабевает в десятки раз. Это может привести к очень серьезным техническим проблемам и даже кризису техногенной цивилизации (нарушению или исчезновению космической и коротковолновой радиосвязи, ослабеванию или нарушению работы трансформаторов, некоторых электрогенераторов и многим другим эффектам, еще не описанным и не предсказанным). Для пояснения этой проблемы важно показать вариации интенсивности магнитного поля во время магнитных бурь, а также возможные пути колебаний ВМП при приближении к точке инверсии (ускорение раскачиваний ВМП и увеличение их амплитуды, переход через 60 параллель и другие индикаторы)

Академик РАН Н.Л. Добрецов

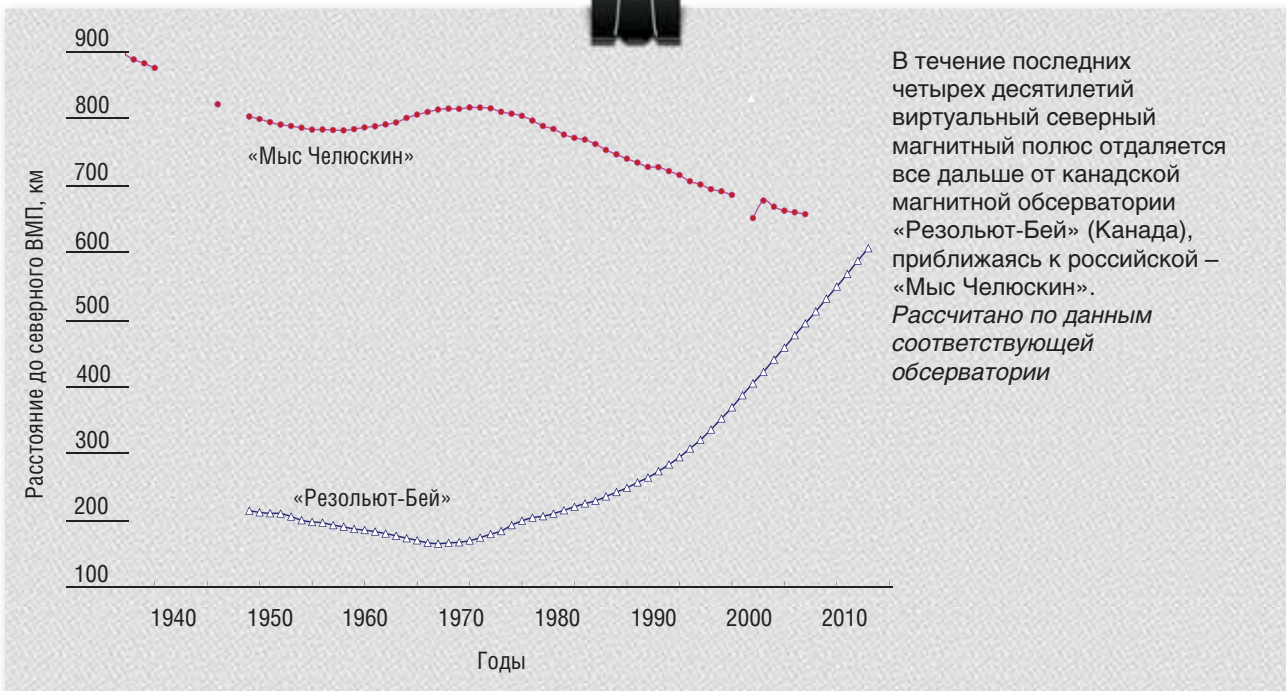
Магнитные обсерватории дают сегодня много информации об изменении географического положения магнитных полюсов Земли год от года. При этом скорости движения виртуальных магнитных полюсов, рассчитанные на основе данных обсерваторий из различных регионов, значительно варьируют (от 2-х до 65-ти км в год) и могут существенно меняться со временем. Арктические же исследования по установлению положения истинного северного магнитного полюса, которые в течение нескольких последних десятилетий ведут канадские магнитологи, очень сложны (Newitt, Niblett, 1986; Newitt, Barton, 1996, Newitt *et al.*, 2009).

На практике магнитологи во время наблюдений в обсерваториях и «в поле», как правило, имеют дело с фактическими («мгновенными») значениями элементов земного магнетизма, привязанными к конкретной секунде и конкретному месту. И скорости движения магнитных полюсов, определенные на основе таких экс-

периментальных данных, оказываются намного больше скоростей, полученных при последующих усреднениях (минутных, часовых, суточных, годовых). При каждой такой процедуре траектории движения полюса становятся все более «выпрямленными», а скорости его движения, соответственно, уменьшаются.

Однако минутные и секундные данные магнитных обсерваторий, пересчитанные в соответствующие географические координаты магнитных полюсов, показывают удивительную подвижность последних. Представим себе сложность ситуации, в которую могут попасть наши канадские коллеги, занимающиеся установлением положения истинного северного магнитного полюса в то время, когда он «летает» мимо них со скоростью самолета ледовой разведки!

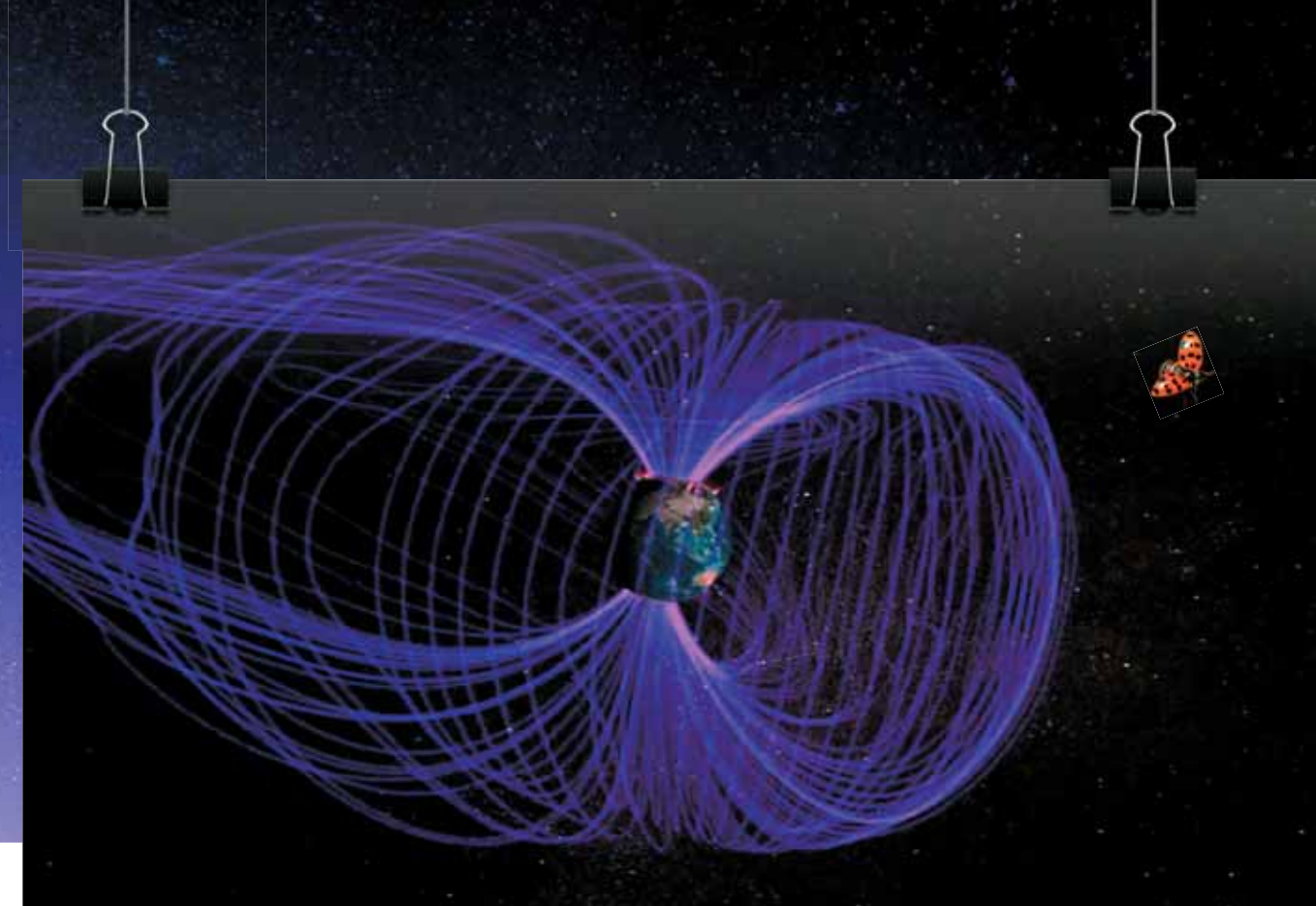
Любопытный вывод можно сделать и относительно инверсии магнитного поля Земли, то есть перехода северного магнитного полюса в южное полушарие (или южного – в северное). Если допустить, что истинные



магнитные полюса могут приближаться к географическому экватору со среднегодовой скоростью порядка 10 км/год, то процесс инверсии может уложиться в 1–2 тыс. лет. Но если бы они могли достаточно долгое время сохранять такое целенаправленное движение со скоростью самолета, автомобиля или даже пешехода, то инверсия произошла бы за считанные годы, дни и даже часы!

Чем ближе к полюсу находится магнитная обсерватория, тем ближе будут располагаться координаты истинного магнитного полюса и виртуального,

Эта впечатляющая фотография полярного сияния над северо-западной частью Тихого океана была сделана с Международной космической станции 20 января 2016 г. Image Credit: ESA/NASA



Космические исследования магнитосферы Земли кластером из пяти микроспутников в рамках проекта THEMIS дали ответы на многие вопросы относительно «космической погоды», в том числе появления бурь над магнитными полюсами Земли, вызывающих полярные сияния. Credit: NASA

рассчитанного на основе параметров магнетизма, измеренного этой обсерваторией. Ближайшими к северному магнитному полюсу обсерваториями в последние годы были канадская магнитная обсерватория «Резольют-Бей» и российская – «Мыс Челюскин». При этом, как свидетельствует многолетние данные, от первой обсерватории полюс удалялся, а ко второй приближался. В ближайшие десятилетия область «блуждания» северного магнитного полюса может переместиться в российский сектор Арктики, поэтому уже сейчас, на наш взгляд, уместно ставить вопрос об организации российской службы истинного магнитного полюса. Остро встает вопрос и об организации современной арктической геомагнитной обсерватории на побережье моря Лаптевых или архипелаге Северная Земля вместо обсерватории «Мыс Челюскин», закрытой в 2011 г.

Авторы благодарят всех сотрудников магнитных обсерваторий сети «ИНТЕРМАГНЕТ», данные которых были использованы в работе

Лумература
 Bauer L.A. The local magnetic constant and its variations // *Terr. Mag. (Washington)*, 1914. V. 19. P. 113–125.
 InterMagNet (International Real Magnetic Network, 2013) register. URL: <http://www.intermagnet.org/data-donnee/>
 Kuznetsov V. V., Pavlova I. V., and Semakov N. N. Estimation of the Position of Virtual Magnetic Poles // *Geol. Geofiz.* 1990. V. 31. N. 2. P. 115–116.
 Kuznetsov V. V., Pavlova I. V., Semakov N. N., Newitt L. R. Virtual magnetic poles, magnetic anomalies, and the location of the north magnetic pole // *Russian Geology and Geophysics*, 1997. V. 38. N. 7. P. 1312–1320.
 Merrill R. T., McElhinny M. W., and McFadden P. L. The magnetic field of the Earth, paleomagnetism, the core and the deep mantle // *Academic Press*, 1998. 531 pp.
 Newitt L. R. and Barton C. E. The position of the North Magnetic Pole in 1994 // *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996. V. 48. P. 221–232.
 Newitt L. R., Chulliat A., and Orgeval J.-J. Location of the North Magnetic Pole in April 2007 // *Earth Planets Space*, 2009. V. 61. P. 703–710.
 Newitt L. R. and Niblett E. R. Relocation of the north magnetic dip pole // *Can. J. Earth Sci.* 1986. V. 23. P. 1062–1067.
 Weinberg B. P. Catalogue of magnetic determinations in U.S.S.R. and in adjacent countries from 1556 to 1926 // *Central Geophysical Observatory, Leningrad*, 1929.