

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **036173**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.10.09

(21) Номер заявки
201892176

(22) Дата подачи заявки
2017.04.18

(51) Int. Cl. **G01C 17/02** (2006.01)
G01R 33/02 (2006.01)
G01V 3/00 (2006.01)

(54) САМОКАЛИБРУЮЩАЯСЯ АВТОНОМНАЯ МАГНИТНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

(31) **2016/5322**

(32) **2016.05.04**

(33) **BE**

(43) **2019.04.30**

(86) **PCT/EP2017/059196**

(87) **WO 2017/190951 2017.11.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ИНСТИТУТ РОЯЛЬ
МЕТЕОРОЛОЖИК ДЕ БЕЛЬЖИК
(BE)**

(72) Изобретатель:
**Рассон Жан, Гонсетте Александре,
Умбле Франсуа (BE)**

(74) Представитель:
**Поликарпов А.В., Соколова М.В.,
Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатьев
А.В. (RU)**

(56) H.U. AUSTER ET AL.: "Automation of absolute measurement of the geomagnetic field", EARTH, PLANETS AND SPACE, vol. 35, no. 10/S, 1 September 2007 (2007-09-01), pages 803-1014, XP055337350, DOI: 10.1186/BF03352041, Sections 3 et 4

O. GRAVRAND ET AL.: "On the calibration of a vectorial 4He pumped magnetometer", EARTH PLANETS SPACE, vol. 53, no. 10, 1 October 2001 (2001-10-01), pages 949-958, XP055017599, ISSN: 1343-8832, DOI: 10.1186/BF03351692, cited in the application, sections 3 et 4

Ivan Hrvoic ET AL.: "Instruments and Methodologies for Measurement of the Earth's Magnetic Field" In: "Geomagnetic Observations and Models, chapter 4", 1 October 2013 (2013-10-01), XP055337832, ISBN: 978-90-48-19858-0, section 4

(57) Изобретение относится к автономной магнитной обсерватории, которая содержит скалярный магнитометр для измерения модуля вектора F напряженности локального магнитного поля, угловой магнитометр для измерения направления вертикали, направления географического севера и направления вектора F напряженности локального магнитного поля, вариометр для измерения трех вариаций в векторе F напряженности локального магнитного поля, часы и контроллер. В такой обсерватории регулятор выполнен с возможностью управления и осуществления контроля над ориентацией датчиков, для получения измерений вариометра, скалярного магнитометра, углового магнитометра и вариометра и для обработки полученных измерений для автоматического определения вектора F напряженности локального магнитного поля и погрешностей в измерениях, связанных с каждым средством измерения.

036173 B1

036173 B1

Область техники

Согласно первому аспекту изобретение относится к магнитным обсерваториям (локального геомагнитного поля) и, в частности, к автономным магнитным обсерваториям.

Согласно второму аспекту изобретение относится к автоматическому и самокалибрующемуся способу получения вектора напряженности локального (геомагнитного) магнитного поля.

Известный уровень техники

Уже имеется определенное количество так называемых автономных магнитных обсерваторий (локального геомагнитного поля). На практике эти обсерватории являются лишь частично автономными. Например, в статье "On the calibration of a vectorial 4He pumped magnetometer" под авторством O. Gravrand, A. Khokhlov, J.L. Le Mouel и J.M. Leger, опубликованной в журнале Earth Planets Space, 53, 949-958, 2001, раскрыты сущность векторного магнитометра, в котором применяют оптическую накачку паров гелия, и способ калибровки этого магнитометра. Этот магнитометр позволяет получить абсолютные измерения силы локального магнитного поля и вариаций в трех ортогональных составляющих локального магнитного поля, вариации которого измеряются одновременно в одном и том же месте. Эта обсерватория также обеспечивает подтверждение положения в вертикальной плоскости. Этот способ обработки данных магнитометра позволяет получить калибровку масштабных коэффициентов из трех вариаций в составляющих и абсолютного значения модуля вектора напряженности локального магнитного поля, что позволяет получить вариации в единицах СИ в трех составляющих вектора напряженности локального магнитного поля.

Тем не менее, эта обсерватория не обеспечивает автоматического измерения направления вектора напряженности локального магнитного поля. Она также не выдает информации о вертикали площадки или о направлении географического севера. Не вносятся поправки за сползание нуля-пункта в связи с колебаниями температуры. Наконец, этот метод не позволяет исправлять ошибки ортогональности, которые появляются с течением времени.

Описание второй частично автономной магнитной обсерватории приводится в работе "GAUSS: Geomagnetic Automated System" под авторством H.U. Auster, M. Manda, A. Hemshorn, M. Korte и E. Pulz, опубликованной в PUBLS. INST. GEOPHYS. POL. ACAD. SC, C-99 (398), 2007. В этой работе приводится описание устройства для автоматического измерения ориентации вектора напряженности локального магнитного поля. Эта автономная обсерватория также выполняет самокалибровку горизонтального положения и положения в вертикальной плоскости путем обнаружения локальной вертикали.

Тем не менее, эта обсерватория не выдает автоматически значений модуля вектора напряженности локального магнитного поля или вариаций в векторе напряженности локального магнитного поля в трех направлениях или направления географического севера. Не предусмотрен способ самокалибровки для корректировки температурного воздействия, для измерения масштабного коэффициента и для проведения ортогональной калибровки.

В заключение, хотя эти магнитные обсерватории часто называются автономными обсерваториями, они фактически являются автономными только частично и требуют вмешательства извне для получения вектора напряженности локального магнитного поля.

Сущность изобретения

Согласно первому аспекту одной из целей настоящего изобретения является создание устройства для получения автономного измерения с самокалибровкой вектора напряженности локального магнитного поля, причем вектор напряженности локального магнитного поля следует понимать как локальное магнитное поле Земли.

С этой целью магнитная обсерватория для измерения вектора напряженности локального магнитного поля содержит скалярный магнитометр для получения абсолютного измерения модуля вектора напряженности локального магнитного поля, магнитный вариометр, который регистрирует вариации в трех математически независимых составляющих вектора напряженности локального магнитного поля, часы, угловой магнитометр и контроллер. Угловой магнитометр содержит первый держатель, выполненный с возможностью ориентации вокруг первой оси вращения, называемой главной осью вращения, и позволяющей получить горизонтальную ориентацию первого ориентируемого держателя, причем указанный первый ориентируемый держатель содержит главный двигатель для изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя вокруг главной оси, датчик угла наклона, второй держатель, выполненный с возможностью ориентации вокруг второй оси вращения, называемой вторичной осью вращения, ортогональной главной оси, позволяющей получить вертикальную ориентацию второго ориентируемого держателя, причем указанный второй ориентируемый держатель содержит вспомогательный двигатель для изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя вокруг вторичной оси, магнитный датчик для измерения направления вектора напряженности локального магнитного поля, устройство, указывающее на север. Угловой магнитометр также содержит устройство для управления главным и вспомогательным двигателями и устройство для измерения и получения по углу горизонтальной и вертикальной ориентаций первого и второго ориентируемых держателей.

Второй ориентируемый держатель может содержать датчик угла наклона. Датчик угла наклона можно установить на первый ориентируемый держатель или на второй ориентируемый держатель.

Магнитная обсерватория выполнена автономной и с возможностью самокалибровки измерений локального магнитного поля посредством контроллера, который выполнен с возможностью автоматического управления главным и вспомогательным двигателями, с возможностью управления ориентацией: датчика угла наклона для измерения направления вертикали, устройства, указывающего на север, для измерения направления географического севера и магнитного датчика для измерения направления вектора напряженности локального магнитного поля. Она также выполнена с возможностью определения углов направления вектора напряженности локального магнитного поля по отношению к географическому северу и к вертикали в зависимости от горизонтальной и вертикальной ориентаций первого и второго ориентируемого держателей, ориентации которых измеряются с помощью устройства для измерения и получения по углу, трех вариаций в векторе напряженности локального магнитного поля, вариации которого измеряются с помощью вариометра, и значений модуля вектора напряженности локального магнитного поля, значения которого измеряются с помощью скалярного магнитометра. Наконец, она выполнена с возможностью обработки данных, полученных заблаговременно, для автоматического получения вектора напряженности локального магнитного поля и погрешностей измерений, связанных с каждым средством измерения.

Обычно применяемые магнитные обсерватории часто устанавливаются в зданиях, содержащих помещения, температура которых регулируется во избежание чрезмерных отклонений средств измерения. Кроме того, определенные измерения проводятся вручную высококвалифицированным оператором. Поэтому эти обсерватории не могут быть установлены в любом месте. Автономная обсерватория имеет преимущество, которое заключается в том, что она может быть установлена там, где требуется, и, самое главное, она не требует присутствия квалифицированного оператора. Поэтому стоимость такой обсерватории несомненно ниже, и эта обсерватория более удобна в использовании. Также можно чаще и более надежно проводить измерения. По сравнению с предыдущими "автономными" обсерваториями, преимущество заключается в наличии набора средств измерения, которые вместе позволяют достигнуть самокалибровки и, следовательно, достигать несомненно более высокой точности, чем позволило бы их простое размещение друг рядом с другом.

Предпочтительно, первый и второй ориентируемые держатели, главный и вспомогательный двигатели, устройство, указывающее на север, датчик угла наклона, устройство для управления главным и вспомогательным двигателями и устройство для измерения и получения по углу выполнены из немагнитных компонентов, определенных таким образом, что магнитная восприимчивость материалов находится в диапазоне от -1 до 1 , предпочтительно от -10^{-1} до 10^{-1} и наиболее предпочтительно от -10^{-3} до 10^{-3} .

Например, немагнитные компоненты представляют собой материалы из следующего списка: керамика, алюминий, сплав Агсар, титан, медь, эрталон, нейлон, Ertacetal, полиэфирэфиркетон.

Выбор этих материалов имеет решающее значение в плане обеспечения хорошего измерения локального магнитного поля, т.е. измерения без помех, создаваемых самим средством измерения.

Предпочтительно скалярный магнитометр выбирается из числа магнитометров следующего типа: протонный магнитометр, магнитометр с эффектом Оверхаузера, квантовый магнитометр, магнитометр с оптической накачкой.

Предпочтительно магнитный датчик выбирается из числа датчиков следующего типа: феррозондовый магнитометр, магнитометр Fluxset, электрическая цепь в состоянии вращения или скалярный магнитометр, поляризованный магнитным устройством.

Предпочтительно устройство, указывающее на север, выбирается из числа устройств следующего типа: глобальная навигационная спутниковая система, глобальная система определения местоположения, целеуказание, указание на небесное тело, гироскоп, детектор абсолютного вращения, поляризация по солнечному свету.

Предпочтительно обсерватория содержит множество немагнитных опорных плит, предпочтительно изготовленных из бетона, средние размеры которых [толщина, ширина, длина] варьируют в диапазоне от $[1, 10, 10]$ см до $[6, 10, 10]$ м; предпочтительно средние размеры которых [толщина, ширина, длина] варьируют от $[10, 20, 20]$ см до $[1, 2, 2]$ м, более предпочтительно от $[15, 25, 25]$ см до $[0,25, 0,5, 0,5]$ м, причем указанные опорные плиты отстоят друг от друга в среднем на расстоянии от 0 до 10 м, предпочтительно на расстоянии от 1 до 6 м, более предпочтительно на расстоянии от 2 до 4 м. Немагнитные опорные плиты поддерживают по меньшей мере один из следующих элементов: скалярный магнитометр, угловой магнитометр, вариометр, часы (201), контроллер.

Хотя обсерватория является самокалибрующей и может быть установлена в любой точке на земной коре, предпочтительно устанавливать ее на устойчивой конструкции, которая не подвержена вибрациям, с целью получения измерений более высокого качества.

Предпочтительно обсерватория содержит по меньшей мере одно немагнитное укрытие, окружающее множество опорных плит и содержащее изолированную стенку, средняя толщина которой варьирует в диапазоне от 1 до 60 см, предпочтительно от 2 до 30 см, более предпочтительно от 5 до 10 см. По меньшей мере одно магнитное укрытие защищает по меньшей мере один из следующих элементов: скалярный магнитометр (MS), угловой магнитометр (MA), вариометр (MV), часы (201), контроллер (202).

Подобно тому, как важна устойчивая структура, ограничение температурных колебаний улучшает

качество измерений и уменьшает сползание нуля-пункта средств измерений.

Согласно второму аспекту настоящее изобретение относится к способу автоматического получения вектора напряженности локального магнитного поля. Этот способ включает этап обеспечения магнитной обсерватории, такой как обсерватория, описанная выше. Затем контроллер осуществляет этап получения значений, управления двигателями, расчета значений, калибровки измерений и, наконец, расчета значения вектора напряженности локального магнитного поля.

Во-первых, контроллер получает измерения модуля указанного вектора напряженности локального магнитного поля, значения которого измеряются с помощью скалярного магнитометра в разные моменты времени t_i , и он получает измерения трех математически независимых компонентов вектора напряженности локального магнитного поля, dU , dV , dW , которые измеряются с помощью вариометра в разные моменты времени t_i . Затем контроллер управляет главным двигателем с целью изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя и в зависимости от показаний датчика угла наклона, измеряет вертикальное направление V ; он также управляет вспомогательным двигателем с целью изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя и в зависимости от показаний устройства, указывающего на север, измеряет направление географического севера N , и он управляет главным и вспомогательным двигателями с целью изменения горизонтальных и вертикальных ориентации углового магнитометра и в зависимости от показаний магнитного датчика, показания которого получены в разные моменты времени t_i , измеряет два угла, D^* и I^* , соответствующие направлению вектора напряженности локального магнитного поля. В-третьих, контроллер вычисляет абсолютные значения двух углов с предварительно полученных направлений таким образом, что

$$D = D^* \cdot N \text{ и} \\ I = I^* \cdot V,$$

он также вычисляет исходные линии вариометра в момент времени t , который является средним значением разных моментов времени t_i , используя абсолютный модуль вектора напряженности локального магнитного поля и углы, все три из которых были получены вышеописанным способом. В-четвертых, контроллер вычисляет масштабные коэффициенты каждого математически независимого компонента вариометра и выполняет калибровку ортогональности и ориентации в пространстве трех математически независимых компонентов вариометра и вычисляет эйлеровы матрицы поворота. В заключение, контроллер вычисляет значение вектора напряженности локального магнитного поля путем получения ориентированных измерений с применением эйлеровых поворотов к трем измерениям вариометра: dU , dV и dW , путем получения измерений, масштабирование которых требуется выполнить путем умножения трех ориентированных измерений вариометра на соответствующие масштабные коэффициенты, и путем получения 3 компонентов вектора напряженности локального магнитного поля путем добавления исходных линий к трем ориентированным измерениям и измерениям, подлежащим масштабированию.

Вышеописанный метод позволяет получения измерения локального магнитного поля автоматически с самокалибровкой. Эта автоматизация позволяет исключить необходимость в присутствии квалифицированного оператора, что существенно образом снижает издержки и улучшает точность измерений. Самокалибровка позволяет улучшить качество измерений. Эта самокалибровка также способствует снижению издержек, так как позволяет устанавливать автономную обсерваторию на конструкции, более дешевой по сравнению с обычно применяемыми обсерваториями. Поэтому сочетание автоматизации и самокалибровки значительным образом повышает эффективность средств измерений, если рассматривать их в отдельности.

Предпочтительно измерение двух углов D^* и I^* , характеризующих направление поля в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно, получают контроллером путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (вращение держателя в горизонтальной плоскости) до тех пор, пока магнитный датчик не укажет на нуль, и получения первого угла D^* , а также путем изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя (вращение держателя в вертикальной плоскости) до тех пор, пока магнитный датчик не укажет на нуль, и получения второго угла I^* .

Более предпочтительно измерение двух углов D^* и I^* получают контроллером путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя таким образом, чтобы магнитный датчик указал на нулевое значение измерения, и получения ориентации $D1$ первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению, затем путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя на 180° и регулировки горизонтальной ориентации таким образом, чтобы магнитный датчик указал на нулевое значение измерения, и получения ориентации $D2$ первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению, затем путем изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя на 180° и регулировки горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя таким образом, чтобы магнитный датчик указал на нулевое значение измерения и получения ориентации $D3$ первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению, затем путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя на 180° и регулировки горизонтальной ориентации таким образом, чтобы магнитный датчик указал на нулевое значение измерения, и получения ориентации $D4$ первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению, и, наконец, путем вычисления первого угла, соответствующего горизонтальному направлению локального

магнитного поля, путем вычисления средней величины четырех измерений:

$$D^* = (D1 + D2 + D3 + D4)/4.$$

Аналогичным образом, измерение I^* получают путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя на направление D^*-90° , затем выполнив те же самые первые три этапа, что были выполнены в отношении D^* , причем на этих этапах горизонтальные и вертикальные ориентации в обратном порядке и на этих этапах роли первого и второго ориентируемых держателей заменены местами, и, таким образом, получают ориентации $I1, I2, I3, I4$ путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя на направление D^*-90° и путем регулировки вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя таким образом, чтобы магнитный датчик указал на нулевое значение измерения, причем ориентация $I4$ второго ориентируемого держателя соответствует этому измерению. Наконец, второй угол, соответствующий второму направлению локального магнитного поля в вертикальной плоскости, вычисляется путем подсчета средней величины четырех измерений:

$$I^* = (I1 + I2 + I3 + I4)/4.$$

Предпочтительно устройство, указывающее на север, представляет собой указывающее устройство типа детектора абсолютного вращения, и контроллер управляет вспомогательным двигателем с целью изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя и в зависимости от показаний устройства, указывающего на север, измеряет направление географического севера N путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя до тех пор, пока детектор абсолютного вращения не укажет на нулевое значение измерения и не получит ориентации N первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению.

Более предпочтительно, измерение направления географического севера N получают аналогично D^* , причем магнитный датчик заменяют детектором абсолютного вращения и ориентации $D1, D2, D3, D4$ и D^* заменяют ориентациями $N1, N2, N3, N4$ и N в способе, описанном выше.

Эти способы измерений имеют преимущество, которое заключается в том, что эти способы измерений исключают все погрешности внутренней настройки средств измерения и поэтому улучшают качество измерений.

Предпочтительно, контроллер вычисляет исходные линии вариометра, исходя из трех измерений вариометра: dU, dV и dW , абсолютного модуля вектора напряженности F локального магнитного поля, двух углов, характеризующих направления вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля: угла наклона I и угла склонения D , и необязательно функций g_U, g_V, g_W , что позволяет осуществить замену координат D, F, I координатами U, V, W . Контроллер вычисляет исходные линии U_0, V_0, W_0 , используя

$$U_0 = g_U(F, D, I) - dU$$

$$V_0 = g_V(F, D, I) - dV$$

$$W_0 = g_W(F, D, I) - dW.$$

Предпочтительно, контроллер выполняет калибровку масштабных коэффициентов каждой составляющей вариометра путем измерения амплитуды вариаций в исходных линиях по отношению к амплитуде сигналов каждой из трех составляющих вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля в течение предварительно заданного периода времени, затем путем умножения трех измерений вариометра (MV): dU, dV и dW на поправочные коэффициенты, масштабные коэффициенты, f_U, f_V, f_W , затем вычитая скорректированные значения и вычисляя исходные линии, используя

$$U_0 = g_U(F, D, I) - f_U * dU$$

$$V_0 = g_V(F, D, I) - f_V * dV$$

$$W_0 = g_W(F, D, I) - f_W * dW$$

Затем контроллер увеличивает или уменьшает соответствующие масштабные коэффициенты для уменьшения вариаций в соответствующих исходных линиях и корректирует измерения вариометра путем умножения на соответствующие масштабные коэффициенты. Эти этапы можно повторять несколько раз до тех пор, пока увеличение или уменьшение масштабных коэффициентов не будет меньше, чем предварительно установленное значение.

Предпочтительно контроллер выполняет калибровку ортогональности и ориентации в пространстве трех математически независимых составляющих вариометра и вычисляет эйлеровы матрицы E поворота путем изучения вариаций в исходной линии составляющей в качестве функции амплитуды сигнала других составляющих в течение предварительно установленного промежутка времени путем вычисления эйлеровых матриц E поворота и путем регулировки ориентации до тех пор, пока вариации в исходной линии не будут меньше, чем предварительно установленное значение.

Предпочтительно скалярный магнитометр и вариометр выполняют измерения с частотой в диапазоне от 0,01 до 100 Гц, предпочтительно в диапазоне от 0,05 до 10 Гц и более предпочтительно в диапа-

зоне от 0,1 до 1 Гц.

Предпочтительно измерения ориентаций вектора напряженности локального магнитного поля выполняют с частотой в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-2} Гц, предпочтительно в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-3} Гц и более предпочтительно в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-4} Гц.

Предпочтительно автономная обсерватория применяет способ, описанный выше.

Краткое описание графических материалов

Пояснения к этим аспектам и другим аспектам настоящего изобретения приводятся в подробном описании конкретных вариантов осуществления настоящего изобретения со ссылкой на графические материалы следующих фигур, на которых

на фиг. 1 показан вектор напряженности локального магнитного поля и его разложение на различные математически независимые составляющие;

на фиг. 2 приведен пример автономной магнитной обсерватории согласно изобретению;

на фиг. 3 - пример варианта осуществления углового магнитометра согласно изобретению;

на фиг. 4 - пример устройства, указывающего на север, исходя из принципа целеуказания;

на фиг. 5 - пример устройства, указывающего на север, исходя из принципа детектора абсолютного вращения;

на фиг. 6 - пример ориентации чувствительной оси магнитного датчика по отношению к локальному магнитному полю;

на фиг. 7 - второй пример автономной магнитной обсерватории согласно настоящему изобретению;

на фиг. 8 показана схема примера способа получения вектора напряженности локального магнитного поля согласно настоящему изобретению;

на фиг. 9a - ошибка нивелирования вдоль оси восток-запад, соответствующей вращению вокруг оси X;

на фиг. 9b приведен пример измерения исходной линии составляющей Z поля с изображением ошибки нивелирования в направлении восток-запад;

на фиг. 10 - пример алгоритма, позволяющего определить погрешности вариометра, связанные с масштабным коэффициентом и ориентацией.

Графические материалы фигур не в масштабе. В целом для схожих элементов на фигурах даны схожие ссылки. Наличие ссылочных позиций на графических материалах не может считаться ограничивающим, включая случаи, когда эти позиции указаны в формуле.

Подробное описание определенных вариантов осуществления изобретения

На фиг. 1 приведен пример вектора напряженности локального магнитного поля Земли, обозначаемый как вектор F напряженности локального магнитного поля ниже, и его разложения на различные математически независимые составляющие. Так как локальное магнитное поле F представляет собой поле вектора напряженности, знание его модуля недостаточно для того, чтобы полностью его охарактеризовать. В частности, необходимо определить его ориентацию относительно исходных направлений. Эти исходные направления предпочтительно представляют собой локальную вертикаль (или, что то же самое, горизонтальная плоскость) и направление географического севера N. Магнитное склонение "D" в этом случае определяется как угол между географическим севером N и проекцией магнитного вектора на горизонтальную плоскость. Магнитное наклонение "I" определяется как угол между горизонтальной плоскостью и магнитным вектором в вертикальной плоскости, содержащей этот вектор.

В декартовых координатах XYZ X указывает в направлении географического севера N, Y указывает в направлении географического востока E, а Z направлено вертикально вниз. В цилиндрических координатах HDZ H является горизонтальной составляющей, D представляет собой магнитное склонение, а Z является вертикальной составляющей (положительной в направлении вниз). В сферических координатах FDI, F представляет собой модуль вектора напряженности локального магнитного поля (модуль вектора), D представляет собой магнитное склонение, а I является магнитным наклонением. Какая бы система координат ни была выбрана, необходимо определить три математически независимых составляющих для того, чтобы полностью охарактеризовать вектор $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля.

Наконец, следует отметить, что между различными значениями существуют следующие соотношения:

$$H = F \cos I, Z = F \sin I, X = H \cos D, Y = H \sin D.$$

На фиг. 2 приведен пример автономной магнитной обсерватории 200 согласно настоящему изобретению. Предпочтительно эта обсерватория 200 содержит скалярный магнитометр MS, угловой магнитометр MA, вариометр MV, часы 201 и контроллер 202.

Предпочтительно скалярный магнитометр MS применяют для измерения силы магнитного поля, или, другими словами, для измерения модуля вектора F напряженности локального магнитного поля. Скалярный магнитометр может считаться абсолютным средством измерения, так как он измеряет количество, которое не является относительным к другому. Термин "скалярный" означает свойство, которое остается неизменным при изменении опорной системы. Скалярный магнитометр MS, например, представляет собой магнитометр одного из следующих типов: протоновый магнитометр, магнитометр с эффектом Оверхаузера, квантовый магнитометр, магнитометр с оптической накачкой. Предпочтительно

измерения модуля вектора F напряженности локального магнитного поля выполняют с частотой в диапазоне от 0,01 до 100 Гц, предпочтительно от 0,05 до 10 Гц и более предпочтительно от 0,1 до 1 Гц. Предпочтительно точность измерений такова, что погрешность измерения меньше чем 1 нТл, более предпочтительно меньше чем 0,5 нТл и в идеальном варианте меньше чем 0,2 нТл.

Так как локальное магнитное поле $\vec{F}$ меняется с течением времени, для синхронизации измерений различных средств измерения используются часы 201, позволяющие определить начальную точку отсчета времени. Эти часы, например, представляют собой сервер времени в сети Интернет, квантовые часы или сигнал глобальной навигационной спутниковой системы. Чем больше вариация в поле в качестве функции времени, тем лучше синхронизация измерений.

На фиг. 3 приведен пример варианта осуществления углового магнитометра МА согласно настоящему изобретению. Угловой магнитометр позволяет определить направление вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля.

В примере, приведенном на фиг. 3, угловой магнитометр МА содержит
 первый держатель 320, выполненный с возможностью ориентации вокруг первой оси вращения, называемой главной осью 321;
 второй держатель 310, выполненный с возможностью ориентации вокруг второй оси вращения, называемой вторичной осью 311, по существу ортогональной главной оси;
 датчик 313 угла наклона;
 устройство 324, указывающее на север;
 магнитный датчик 323 для измерения направления вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля.

Предпочтительно первый держатель содержит главный двигатель 322 для изменения ориентации первого ориентируемого держателя 320 вокруг главной оси, датчик 313 угла наклона, второй ориентируемый держатель 310. Две оси 321 и 311 вращения обеспечивают движение в двух, по существу, ортогональных (горизонтальной и вертикальной) плоскостях. Эти движения позволяют получить горизонтальную ориентацию первого ориентируемого держателя и вертикальную ориентацию второго ориентируемого держателя. Предпочтительно второй ориентируемый держатель 310 содержит вспомогательный двигатель 312 для изменения ориентации второго ориентируемого держателя вокруг вторичной оси 311, магнитный датчик 323 для измерения направления вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля и устройство 324, указывающее на север. Предпочтительно угловой магнитометр МА также содержит устройство 340 для управления главным двигателем 322 и вспомогательным двигателем 312 и устройство 350 для измерения и получения по углу горизонтальной и вертикальной ориентаций первого и второго ориентируемых держателей 320, 310. Предпочтительно угловой магнитометр имеет две степени свободы при вращении и может ориентировать магнитный датчик 323 в произвольном направлении. В частности, он выполнен с возможностью осуществления ориентации магнитного датчика в зависимости от магнитного поля.

Предпочтительно главный двигатель 322 и вспомогательный двигатель 312 имеют пренебрежимо малый магнитный эффект, так что они не создают помех для измерения магнитного поля. Например, эти двигатели являются пьезоэлектрическими двигателями.

Устройство 350 для измерения по углу и получения по углу позволяет измерять угол вращения первого и второго ориентируемых держателей 320 и 310 вокруг каждой из главной оси 321 и вторичной оси 311 соответственно. Это устройство, например, является оптическим датчиком углового положения. Это устройство может использоваться в качестве сигнала обратной связи для автоматически управляемого углового движения.

Предпочтительно положение главной оси 321 может быть отрегулировано с помощью "регулируемых" винтов. Также возможно применение других решений, таких как карданный шарнир, шаровое шарнирное соединение или подвесная система маятникового типа.

Датчик 313 угла наклона измеряет ориентацию главной оси 321 к вертикали. Датчик угла наклона позволяет получить первое исходное направление. Этот датчик, например, является электролитическим датчиком или датчиком ускорения, измеряющим силу тяжести. Предпочтительно датчик угла наклона надежно прикреплен к системе отсчета, которая вращается со вторичной осью 311, и, следовательно, надежно прикреплен к устройству 324, указывающему на север, и к магнитному датчику 323. Датчик угла наклона также может быть размещен в системе отсчета, которая привязана к главной оси 321.

В улучшенной версии углового магнитометра МА также содержит вспомогательный датчик 314 угла наклона, который может быть установлен в неповоротной части средства измерения. Предпочтительно вспомогательный датчик угла наклона имеет две степени свободы.

Угловой магнитометр МА содержит устройство 324, указывающее на север. Это устройство, указывающее на север, позволяет установить направление географического севера N и, таким образом, определить второе исходное направление. Предпочтительно устройство, указывающее на север, имеет две степени свободы, т.е. оно может выполнять вращения вокруг главной оси 321 и вторичной оси 311.

Устройство 324, указывающее на север, например, представляет собой систему целеуказания, та-

кую как показанная на фиг. 4. Такое устройство указывает в направлении Цели, угол Az которой к географическому северу N заранее известен. Таким образом, на основании этого выводится направление географического севера N . Такое устройство может быть лазером, направленным на световозвращающий отражатель. Возвращающийся луч затем захватывается таким устройством, как фотоэлемент или ПЧД (позиционно-чувствительный детектор). Возможны и другие решения, такие как камера на приборе с зарядовой связью. Маяки глобальной системы определения местоположения или глобальной навигационной спутниковой системы также могут служить целью. На фиг. 4 также показано направление магнитного севера N_{mag} и угол склонения D .

Альтернативно, устройство 324, указывающее на север, может представлять собой устройство, указывающее на солнце: можно вывести направление географического севера N путем направления такого устройства на солнце в определенный момент времени (независимо от того, скрыто ли солнце облаками, например, посредством поляризационных светофильтров). Известные методы требуют наличия информации о звездном времени, склонении и прямом восхождении солнца. Эти данные доступны в астрономических таблицах или выводятся из моделей. В качестве устройства, указывающего на небесное тело, также могут применяться другие устройства: предыдущий принцип может применяться к любому другому видимому небесному телу. Камера ориентации по звездам: в постоянной во времени системе координат по отношению к обсерватории звезды не являются неподвижными на небе. Их снимок в определенный момент времени в таком случае позволяет определить направление географического севера N . Предпочтительно устройство 324, указывающее на север, представляет собой детектор абсолютного вращения, такой как показанный на фиг. 5. Этот тип датчика может определять вращение Ω_c Земли. Этот детектор измеряет проекцию горизонтального компонента 510 земного вектора вращения на его чувствительную ось 520. На фиг. 5 приведен пример проекции для широты θ , и показан угол Ψ ориентации чувствительной оси, измеренный по отношению к географическому северу N (не показан). Эти два направления расположены в одной и той же горизонтальной плоскости. Если эту чувствительную ось переместить в горизонтальной плоскости, ее выходная величина описывает синусоиду, максимумы которой расположены в направлении север-юг, и нули которой расположены в направлении восток-запад.

Эти датчики или гироскопы могут, в частности, быть механическими, волоконно-оптическими (FOG), кольцевыми лазерными (RLG), полусферическими резонансными (HRG), микроэлектромеханическими (MEMS) или атомными.

Магнитный датчик 323 представляет собой направленный датчик магнитного поля, чувствительная ось которого может быть ориентирована вокруг главной оси 321 вращения и вторичной оси 311 вращения углового магнитометра МА. Этот магнитный датчик может, например, быть феррозондовым магнитометром, магнитометром Fluxset, электрической цепью в состоянии вращения или скалярным магнитометром, поляризованным магнитным устройством. Выход T этого магнитного датчика 323 пропорционален скалярному произведению локального магнитного поля $\vec{F}$, умноженного на единичный вектор $\vec{n}$ параллельно его чувствительной оси (см. фиг. 6)

$$T = k(\vec{n} \cdot \vec{F}),$$

где k является коэффициентом пропорциональности или масштабным коэффициентом магнитного датчика.

Магнитный датчик 323 может быть выполнен с возможностью измерения силы магнитного поля (скалярного измерения). Поэтому скалярный магнитометр MS может быть частью углового магнитометра МА. Такой датчик может быть одноосным или трехосным феррозондовым магнитометром полного поля, трехосным магнитометром Fluxset или скалярным магнитометром. Скалярное измерение также можно проводить с помощью вспомогательного магнитного датчика, входящего в состав средства измерения. Предпочтительно измерения ориентации вектора напряженности локального магнитного поля выполняют с частотой в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-2} Гц, предпочтительно в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-3} Гц и более предпочтительно в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-4} Гц. Предпочтительно точность угловых измерений в горизонтальной плоскости такова, что погрешность измерения меньше, чем 20 дуговых секунд, более предпочтительно меньше, чем 10 дуговых секунд, и в идеальном варианте меньше, чем 6 дуговых секунд. Предпочтительно точность угловых измерений в вертикальной плоскости такова, что погрешность измерения меньше, чем 10 дуговых секунд, более предпочтительно меньше, чем 5 дуговых секунд, и в идеальном варианте меньше, чем 1 дуговая секунда.

Вариометр MV, также называемый векторным магнитометром, измеряет вариации в трех математически независимых составляющих локального магнитного поля $\vec{F}$ через равные промежутки времени.

Предпочтительно эти измерения трех математически независимых составляющих локального магнитного поля $\vec{F}$ выполняют с частотой в диапазоне от 0,01 до 100 Гц, предпочтительно от 0,05 до 10 Гц и более предпочтительно от 0,1 до 1 Гц. Предпочтительно точность измерений такова, что погрешность измерения меньше чем 2 нТл, более предпочтительно меньше чем 1 нТл и в идеальном варианте меньше чем 0,5 нТл. Эти измерения являются более точными, чем абсолютные измерения, проводимые с помощью угловых и скалярных магнитометров, но они должны быть откалиброваны согласно исходным значениям. Вариометр MV и скалярный магнитометр MS могут быть объединены в одном и том же средстве

измерения.

Автономная обсерватория также содержит контроллер 202. Этот контроллер выполнен с возможностью:

- а) автоматического управления главным двигателем 322 и вспомогательным двигателем 312;
- б) управления ориентацией:
 - 1) датчика 313 угла наклона для измерения направления вертикали V;
 - 2) устройства 324, указывающего на север, для измерения направления географического севера N;
 - 3) магнитного датчика 323 для измерения направления вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля;
- в) получения:
 - 1) углов направления вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля по отношению к географическому северу N и к вертикали V в зависимости от горизонтальной и вертикальной ориентаций первого и второго ориентируемых держателей;
 - 2) трех вариаций в векторе $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, которые измеряются с помощью вариометра MV;
 - 3) значений модуля вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, которые измеряются с помощью скалярного магнитометра MS;
- г) обработки данных, полученных на этапе в) с целью автоматического получения вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля и обнаружения погрешностей в измерениях, связанных с каждым средством измерения.

Предпочтительно, первый и второй ориентируемые держатели 320 и 310, главный двигатель 322 и вспомогательный двигатель 312, устройство 324, указывающее на север, устройство 340 для управления двигателями и устройство 350 для измерения и получения по углу выполнены из немагнитных компонентов, т.е., магнитная восприимчивость материалов, из которых они выполнены, находится в диапазоне от -1 до 1, предпочтительно от -10^{-1} до 10^{-1} и наиболее предпочтительно от -10^{-3} до 10^{-3} . Например, материалы выбирают из следующего списка: керамика, алюминий, сплав Аргар, титан, медь, эрталон, нейлон, Ertacetal, полиэфирэфиркетон.

На фиг. 7 приведен второй пример автономной магнитной обсерватории 700 согласно настоящему изобретению. В этом примере автономная магнитная обсерватория содержит угловой магнитометр МА, скалярный магнитометр MS, вариометр MV, часы 201, контроллер 202, такой как описанный выше. Обсерватория 700 дополнительно содержит источник 701 питания, и контроллер 202 дополнительно может получать и передавать данные от средств измерения (МА, MS, MV) внешней сети через систему 702 связи. Предпочтительно, магнитометры расположены далеко от различной электроники во избежание помех, создаваемых ею. Угловой магнитометр МА и вариометр MV могут вставляться в теплоизоляционные камеры с высокой тепловой инерцией. Также может быть предусмотрена многослойная конструкция. Угловой магнитометр МА и вариометр MV могут быть установлены на устойчивом держателе, таком как опорная плита, закрепленная на твердом основании 730. Основанием может служить камень или плита, состоящие из немагнитных материалов. В примере, показанном на фиг. 7, два немагнитных укрытия 710 окружают множество опорных плит 711 и содержат изолированную стенку 720, средняя толщина которой варьирует в диапазоне от 1 до 60 см, предпочтительно в диапазоне от 2 до 30 см и более предпочтительно в диапазоне от 5 до 10 см. Предпочтительно множество немагнитных опорных плит, предпочтительно изготовленных из бетона, имеют средние размеры [толщина, ширина, длина], которые варьируют в диапазоне от [1, 10, 10] см до [6, 10, 10] м; предпочтительно средние размеры [толщина, ширина, длина] варьируют от [10, 20, 20] см до [1, 2, 2] м, более предпочтительно от [15, 25, 25] см до [0,25, 0,5, 0,5] м, причем указанные опорные плиты отстоят друг от друга в среднем на расстоянии от 0 до 10 м, предпочтительно на расстоянии от 1 до 6 м, более предпочтительно на расстоянии от 2 до 4 м. В этом примере одно из укрытий 710 содержит векторный магнитометр MV, а другое укрытие содержит угловой магнитометр МА. Предпочтительно обсерватория содержит одно укрытие 710.

Предпочтительно немагнитные опорные плиты 711 поддерживают по меньшей мере один из следующих элементов: скалярный магнитометр MS, угловой магнитометр МА, вариометр MV, часы 201, контроллер 202. Предпочтительно немагнитное укрытие защищает по меньшей мере один из следующих элементов: скалярный магнитометр MS, угловой магнитометр МА, вариометр MV, часы 201, контроллер 202.

Автономная магнитная обсерватория согласно настоящему изобретению может быть установлена на грунте или под водой, например на дне моря. Когда она погружена в воду, средства измерения (МА, MS, MV), часы 201 и контроллер 202 защищены одним или несколькими водонепроницаемыми защитными кожухами. Средства измерения (МА, MS, MV), часы 201 и контроллер 202 установлены в одном кожухе или предпочтительно в отдельных кожухах. Один или несколько кожухов предотвращают повреждение или уничтожение их содержимого окружающей водой. Например, на подводную магнитную обсерваторию может подаваться электропитание от батарей, через подводный кабель, через поверхностный буй, подсоединенный к обсерватории через проводящий кабель, от генератора, который генерирует

электричество, используя энергию морских течений.

Согласно второму аспекту изобретение относится к способу получения вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля.

На фиг. 8 показана схема примера способа 800 для получения вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля согласно настоящему изобретению. Этот способ включает следующие этапы:

- a) S810: обеспечение магнитной обсерватории, такой, как описана выше;
- b) S820: контроллер 202 получает измерения модуля вектора F напряженности локального магнитного поля, измерения по которому выполняются с помощью скалярного магнитометра MS в разные моменты времени t_i ;
- c) S830: контроллер получает измерения трех математически независимых составляющих вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, dU , dV , dW , измерения по которым выполняются с помощью вариометра MV в разные моменты времени t_i ;
- d) S840: контроллер управляет главным двигателем 322 для изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 и в зависимости от показаний датчика угла наклона измеряет вертикаль V ;
- e) S841: контроллер управляет вспомогательным двигателем 312 для изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя 310 и в зависимости от показаний устройства 324, указывающего на север, измеряет направление географического севера N ;
- f) S842: контроллер управляет главным и вспомогательным двигателями для изменения горизонтальной и вертикальной ориентаций углового магнитометра MA и в зависимости от показаний магнитного датчика 323, показания которого получены в разные моменты времени t_i , измеряет два угла D^* и I^* , соответствующие направлению вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля;
- g) S843: контроллер вычисляет абсолютные значения двух углов с направлений, полученных на этапах d)-f) таким образом, что

$$D = D^* - N$$

$$\text{и } I = I^* - V;$$

h) S850: контроллер вычисляет исходные линии вариометра MV в момент времени t , который является средним значением различных моментов времени t_i , используя абсолютный модуль вектора F напряженности локального магнитного поля, полученный в соответствии с этапом b), и углы, полученные в соответствии с этапом g);

i) S860: контроллер выполняет калибровку масштабных коэффициентов каждой математически независимой составляющей вариометра MV;

j) S861: контроллер выполняет калибровку ортогональности и ориентации в пространстве трех математически независимых составляющих вариометра MV и вычисляет эйлеровы матрицы E поворота;

k) S870: контроллер вычисляет значение вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля путем осуществления следующих этапов:

1) S871: получение ориентированных измерений, применяя эйлеровы матрицы E поворота, которые были получены на этапе j), в отношении трех измерений вариометра MV: dU , dV и dW ;

2) S872: получение измерений, подлежащих масштабированию, путем умножения трех ориентированных измерений вариометра MV на соответствующие масштабные коэффициенты, полученные на этапе i);

3) S873: получение 3 компонентов вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля путем добавления исходных линий к трем ориентированным и подлежащим масштабированию измерениям.

Вектор $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля меняется с течением времени, поэтому необходимо проводить измерения в разные моменты времени t_i .

Скалярный магнитометр MS является средством измерения, способным выдавать значение модуля локального магнитного поля F с такой точностью, что погрешность измерения обычно меньше чем 1 нТл, предпочтительно меньше чем 0,5 нТл и в идеальном варианте меньше чем 0,2 нТл. Контроллер 202 автономной обсерватории выполнен с возможностью получать значения, выдаваемые скалярным магнитометром MS.

Предпочтительно контроллер 202 управляет главным двигателем 322 и вспомогательным двигателем 312 для измерения вертикального направления V с помощью датчика угла наклона. Контроллер также выполнен с возможностью управления главным двигателем 322 и вспомогательным двигателем 312 для измерения направления географического севера N с помощью устройства 324, указывающего на север.

Предпочтительно устройство 324, указывающее на север, представляет собой детектор абсолютного вращения, и поиск географического севера N заключается в изменении горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 до тех пор, пока детектор абсолютного вращения не укажет на нулевое значение измерения. Контроллер 202 затем получает ориентацию первого держателя с указанием на географический север N .

Альтернативно устройство, указывающее на север, представляет собой детектор абсолютного вра-

щения, и поиск географического севера N включает следующие этапы:

а) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 таким образом, что детектор абсолютного вращения показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации N1 первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

б) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 на 180° и корректировка горизонтальной ориентации таким образом, что детектор абсолютного вращения показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации N2 первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

с) изменение вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя 310 на 180° и корректировка горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 таким образом, что детектор абсолютного вращения показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации N3 первого ориентируемого держателя 320, соответствующей этому измерению;

д) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 на 180° и корректировка горизонтальной ориентации таким образом, что детектор абсолютного вращения показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации N4 первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

е) вычисление направления географического севера N путем вычисления среднего значения четырех измерений:

$$N = (N1 + N2 + N3 + N4)/4.$$

Измерение географического севера N и вертикали V позволяет определить справочную систему координат, в которой вектор $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля выражен.

После того как станет известно направление географического севера N и вертикали V, будет получена локальная система отсчета, в которой будут выражены две ориентации вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, которые определяют с помощью контроллера 202 с помощью углового магнитометра МА и его магнитного датчика 323. Предпочтительно магнитный датчик 323 углового магнитометра МА представляет собой датчик направления, так что измеряется только составляющая локального магнитного поля, параллельная чувствительной оси датчика. Выходные данные датчика в этом случае представлены в виде следующего скалярного произведения:

$$T = k(\vec{n} \cdot \vec{F}),$$

где T - выходные данные датчика, которые обычно выражаются в нанотеслах (нТл), k - масштабный коэффициент датчика, $\vec{n}$ - единичный вектор, параллельный чувствительной оси датчика, и $\vec{F}$ обозначает вектор напряженности локального магнитного поля. Например, ориентация магнитного датчика 323, перпендикулярная магнитному полю, имеет результатом скалярное произведение, равное нулю. Таким образом, можно говорить о нулевом или компенсационном методе измерения. Поэтому контроллер 202 выполнен с возможностью измерения двух углов D* и I* путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320, пока магнитный датчик не укажет на минимальное значение, которое в идеальном варианте равно нулю, что дает первую ориентацию D*. Затем контроллер изменяет вертикальную ориентацию второго ориентируемого держателя 310, пока магнитный датчик не укажет на минимальное значение, которое в идеальном варианте равно нулю, что дает вторую ориентацию I*.

Предпочтительно с целью уменьшения погрешностей измерения и отдельных ошибок, обусловленных средствами измерения, измеряют множество нулей. Обычно составляющая магнитного поля, измеряемая магнитным датчиком 323, может быть выражена как функция двух степеней свободы и различных погрешностей выравнивания, используя модель Лаурдсена, которая известна специалистам в данной области техники (Lauridsen K.E., 1985. Experiences with the DI-fluxgate magnetometer inclusive theory of the instrument and comparison with other methods. Danish Meteorological Institute Geophysical Papers, R-71)

$$T = H \cos(\alpha - D) (\cos(\beta) - \epsilon \sin(\beta)) - \gamma H \sin(\alpha - D) + Z(\epsilon \cos(\beta) + \sin(\beta)) + T_0$$

где T - выходные данные магнитного датчика 323; T0 - необязательное смещение; H - горизонтальная составляющая (в плоскости, перпендикулярной главной оси 321) вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля; Z - вертикальная составляющая (параллельная главной оси) вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля; D - магнитное склонение; α - угол углового магнитометра МА в горизонтальной плоскости к географическому северу; β - угол в вертикальной плоскости к вертикали; ϵ - ошибка выравнивания магнитного датчика 323 по отношению к его чувствительной оси в вертикальной плоскости; γ - ошибка выравнивания магнитного датчика по отношению к его чувствительной оси в горизонтальной плоскости, когда чувствительная ось является горизонтальной. Угловые направления магнитного поля в этом случае определяются путем поиска ориентации магнитного центра, которые, по существу, перпендикулярны магнитному полю. Известные методы (Lauridsen, Kerridge: Kerridge D.J. (1988). Theory of the fluxgate-theodolite. British Geological Survey Technical Report, Geomagnetism Series, WW/88/14) делают возможной компенсацию погрешностей датчика, связанных с выравниванием и сме-

щением.

Например, контроллер 202 управляет главным и вспомогательным двигателями для изменения горизонтальной и вертикальной ориентаций углового магнитометра МА и осуществляет поиск нулей, соответствующих 4 ориентациям ($\pm 180^\circ$ в горизонтальном направлении и $\pm 180^\circ$ в вертикальном направлении). Например, чтобы найти склонение D, контроллер выполняет следующие этапы:

а) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 таким образом, что магнитный датчик 323 показывает нулевое значение измерения и получение ориентации D1 первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

б) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 на 180° и корректировка горизонтальной ориентации таким образом, что магнитный датчик 323 показывает нулевое значение измерения и получение ориентации D2 первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

с) изменение вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя 310 на 180° и корректировка горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 таким образом, что магнитный датчик 323 показывает нулевое значение измерения и получение ориентации D3 первого ориентируемого держателя, соответствующую этому измерению;

д) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 на 180° и корректировка горизонтальной ориентации таким образом, что магнитный датчик 323 показывает нулевое значение измерения и получение ориентации D4 первого ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

е) вычисление первого угла, соответствующего горизонтальному направлению локального магнитного поля, путем вычисления среднего значения четырех измерений

$$D^* = (D1 + D2 + D3 + D4)/4;$$

Схожим образом, контроллер 202 получает магнитное наклонение I путем выполнения следующих этапов:

ф) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 к направлению D^*-90° ;

г) выполнение этапов а)-с), на которых горизонтальная и вертикальная ориентации заменены местами и на которых роли первого и второго ориентируемых держателей 320, 310 заменены местами, и, таким образом, получение ориентаций I1, I2, I3;

х) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя 320 к направлению D^*-90° и корректировка вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя 310 таким образом, что магнитный датчик 323 показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации I4 второго ориентируемого держателя, соответствующей этому измерению;

и) вычисление второго угла, соответствующего второму направлению локального магнитного поля, путем вычисления среднего значения четырех измерений

$$I^* = (I1 + I2 + I3 + I4)/4.$$

Альтернативно, второй метод заключается в поиске направления, в котором магнитный датчик 323 показывает значение измерения, которое близко к нулю, но которое имеет остаток dT. Составляющие локального магнитного поля, поиск ориентации которых выполняют, могут быть преобразованы с помощью следующих соотношений:

$$\delta D = \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{dT}{H}\right)$$

$$\delta I = \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{dT}{F}\right)$$

где H является величиной горизонтальной составляющей вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, а F является модулем вектора напряженности локального магнитного поля. Затем каждое измерение корректируют с учетом его остатка.

Затем вычисляют ориентации D и I с помощью контроллера 202 в системе отсчета географического севера N и вертикали таким образом, что

$$D = D^* - N \text{ и } I = I^* - V.$$

Контроллер 202 получает значения трех составляющих вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля: dU, dV, dW, значения которого измеряют с помощью вариометра MV в разные моменты времени ti. В магнитной обсерватории измерение магнитного поля предпочтительно выполняют с помощью векторного магнитометра MV, который измеряет вариации в трех составляющих магнитного поля через равные промежутки времени (например, 10, 1, 0,05 Гц). Это вопрос относительных измерений по отношению к исходной точке. Поэтому эти измерения должны быть откалиброваны, используя абсолютные измерения, выполненные угловым магнитометром МА и скалярным магнитометром MS.

Значения трех составляющих вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля: dU, dV, dW,

значения которых измеряются с помощью вариометра MV, представляют собой вариации в составляющих относительно исходной величины. Эта исходная величина, обычно называемая "исходной линией" LDB, определяется путем вычитания вариации как функции времени в составляющей от ее "абсолютного" или полного значения. Вариация как функция времени является относительным значением составляющей, измеряемым вариометром MV. Для составляющей C соотношение выглядит следующим образом:

$$C_0 = C(t) - \delta C(t),$$

где C_0 - LDB составляющей C, который принимается независимым от времени; $C(t)$ - "абсолютное" значение C в момент времени t (значение которого выводится из абсолютных значений углового магнитометра MA и скалярного магнитометра MS); и $\delta C(t)$ - вариация в C в момент времени t, которая измеряется с помощью вариометра MV. Вычисление исходных линий вариометра MV в момент времени t, который является средним значением разных моментов времени t_i , следовательно, получают с использованием абсолютного модуля вектора F напряженности локального магнитного поля и углов D и I.

Значение LDB зависит только от применения MV, а не от самого магнитного поля. Однако это значение может изменяться с течением времени, например, под воздействием температуры. Затем обычные абсолютные измерения позволяют скорректировать это значение. При вычислении LDB также может потребоваться изменение координат, например замена координат D, F, I любой другой системой координат U, V, W. Затем контроллер 202 вычисляет исходные линии вариометра MV, исходя из трех измерений вариометра MV: dU, dV и dW, абсолютного модуля вектора F напряженности локального магнитного поля, двух углов, характеризующих направление вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля: угла наклона I, угла склонения D и функций g_U , g_V , g_W , что позволяет осуществить замену координат D, F, I координатами U, V, W. Контроллер вычисляет исходные линии U_0 , V_0 , W_0 , используя

$$U_0 = g_U(F, D, I) - dU$$

$$V_0 = g_V(F, D, I) - dV$$

$$W_0 = g_W(F, D, I) - dW.$$

Вариометр MV может также показывать ошибки, обусловленные масштабным коэффициентом (по одной на составляющую), которые должны быть откалиброваны посредством контроллера 202. В частности, поле обычно измеряется путем цепи измерения, которая преобразовывает основной магнитный сигнал в сигнал, пригодный для использования контроллером, например в ток, напряжение или цифровые биты. Масштабный коэффициент обычно применяется для интерпретации выходного сигнала с цепи измерения. Определение исходной линии до достаточной высокой точности позволяет наблюдать этот эффект и выполнять его корректировку. Например, контроллер выполняет калибровку масштабных коэффициентов каждой составляющей вариометра MV путем выполнения следующих этапов:

а) измерение амплитуд вариаций в исходных линиях по отношению к амплитудам сигналов каждой из трех составляющих вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля в заранее установленный период времени;

б) умножение трех измерений вариометра MV: dU, dV и dW на поправочные коэффициенты, масштабные коэффициенты, f_U , f_V , f_W ;

с) вычитание значений с учетом поправок и вычисление исходных линий, используя

$$U_0 = g_U(F, D, I) - f_U * dU$$

$$V_0 = g_V(F, D, I) - f_V * dV$$

$$W_0 = g_W(F, D, I) - f_W * dW$$

д) увеличение или уменьшение соответствующих масштабных коэффициентов для уменьшения вариаций в соответствующих исходных линиях;

е) корректировка измерений вариометра MV путем умножения на соответствующие масштабные коэффициенты;

этапы а)-д) могут быть повторены до тех пор, пока увеличение или уменьшение в масштабных коэффициентах не будет меньше, чем заданная величина.

Например, применительно к склонению D

$$D_0^*(t) = D(t) - \delta D^*(t)$$

$$\delta D^*(t) = (1 + \alpha)\delta D(t)$$

$$D_0^*(t) = D(t) - \delta D(t) - \alpha * \delta D(t)$$

$$D_0^*(t) = D_0 - \alpha * \delta D(t)$$

где $D_0^*(t)$ - LDB, рассчитанное с использованием низкого масштабного коэффициентат; и α - ошибка, обусловленная масштабным коэффициентом. Предыдущие уравнения могут быть применены в отношении других составляющих магнитного поля.

Наконец, вариометр MV может показывать ошибку ортогональности и/или ошибку ориентации или может быть плохо сориентирован для измерения "нетрадиционных" составляющих. Эти ошибки должны быть исправлены и откалиброваны с помощью контроллера 202. В этом случае возможно установить соотношение между составляющей, измеренной с помощью вариометра MV, и LDB другой составляющей с помощью обычных абсолютных измерений. Как и в предыдущем случае, поправка обычно минимизирует это соотношение. Поправка заключается в изменении базисной матрицы для восстановления базовых составляющих магнитного поля. Изменение базисной матрицы называется эйлеровой матрицей E. Таким образом, контроллер выполняет калибровку ортогональности и ориентации в пространстве трех математически независимых составляющих вариометра MV и вычисляет эйлеровы матрицы E поворота путем осуществления следующих этапов:

- а) изучение вариации в исходной линии составляющей как функции амплитуды сигнала других составляющих в течение заданного периода времени;
- б) вычисление эйлеровых матриц E поворота и корректировка ориентации до тех пор, пока вариация в исходной линии не будет меньше, чем заданное значение.

Вышеупомянутые ошибки могут быть при сдаче в эксплуатацию обсерватории, меняться или возникать со временем. Например, вариометр MV может быть установлен на неустойчивой опорной плите. Поправка должна вноситься в ходе эксплуатации обсерватории. В частности, настоящее изобретение может осуществлять управление и исправление этих ошибок в режиме реального времени.

По выполнении различных калибровок контроллер 202 вычисляет значение вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля путем осуществления следующих этапов:

- а) S871: получение ориентированных измерений путем применения эйлеровых поворотов E к трем измерениям вариометра MV: dU, dV и dW;
- б) S872: получение измерений, которые подлежат масштабированию, путем умножения трех ориентированных измерений вариометра MV на масштабные коэффициенты;
- в) S873: получение 3 составляющих вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля путем добавления исходных линий к трем ориентированным и масштабируемым измерениям.

Например, вариометр MV может измерять вариации в составляющих X, Y, Z, составляющих H и F, которые обычно выражаются в нанотеслах (нТл), или угловых составляющих D и I, которые обычно выражаются в дугowych минутах, дугowych секундах, градусах-минутах-секундах или десятичных градусах. Модуль локального магнитного поля выдается скалярным магнитометром MS, абсолютные значения угловых компонентов, предпочтительно склонение D и наклонение I выдаются угловым магнитометром MA.

Пример обсерватории в конфигурации XYZ.

Вариометр MV измеряет вариации в составляющих вектора поля в декартовой системе координат, при этом каждая чувствительная ось обращена в направлении измеряемой составляющей вектора. Исходными линиями для каждой составляющей вектора являются

$$X_0 = X(t) - \delta X(t), Y_0 = Y(t) - \delta Y(t), \\ Z_0 = Z(t) - \delta Z(t).$$

Считается, что эти исходные линии (LDB) остаются постоянными. Однако масштабные коэффициенты измерений могут быть ошибочными. В таком случае появляется соотношение между LDB и ее составляющими. Затем повторяющийся процесс позволяет скорректировать масштабный коэффициент. Например, для X

$$X_0^*(t) = X(t) - (1 + \alpha)\delta X(t), X_0^*(t) = X_0 - \alpha * \delta X(t), \text{corr}(X_0^*(t), X(t)) \neq 0,$$

где corr означает коэффициент линейной корреляции. Можно минимизировать коэффициент корреляции (или ковариацию) или непосредственно минимизировать вариации в LDB и в комбинации обеих. Одно возможное решение заключается в проведении множества абсолютных измерений за день (например, каждые 30 мин или каждый час) и в наблюдении за суточными изменениями в LDB, соответствующими суточным изменениям в его составляющей. Затем определяются следующие величины:

$$t_1 = t \mid X_0^*(t_1) = \max(X_0^*(t)), t_2 = t \mid X_0^*(t_2) = \min(X_0^*(t)), \alpha \approx \frac{X_0^*(t_1) - X_0^*(t_2)}{\delta X(t_1) - \delta Y(t_2)}$$

Альтернативно измерения можно растянуть на несколько дней, а также можно усреднить или сгладить.

Измерения могут содержать ошибку ориентации. Как и в предыдущем случае, одно решение заключается в измерении LDB с частотой, позволяющей наблюдать за суточными изменениями. На фиг. 9а показана ошибка ϕ нивелирования вдоль оси восток-запад, соответствующей вращению вокруг оси X. Выход датчика затем становится (в матричном представлении)

$$\begin{pmatrix} \delta X^* \\ \delta Y^* \\ \delta Z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{pmatrix}$$

Получают матрицу вращения, которая определяет вращение вокруг оси X. Вычисление LDB, как представлено выше, в этом случае требует обратного преобразования, что является не чем иным, как транспозиция предыдущей матрицы

$$\begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta X^* \\ \delta Y^* \\ \delta Z^* \end{pmatrix}$$

Значение ϕ может определяться эмпирически или путем вычисления (опционально итеративного вычисления) с учетом LDB. Например, возможно стремиться минимизировать вариацию исходной линии или ковариацию LDB с другой составляющей. В случае возникновения незначительной ошибки ориентации можно считать, что $\cos(\phi) \approx 1$ и $\sin(\phi) \approx \phi$ (в радианах)

$$Z_0^* = Z - \delta Z^*, Z_0^* = Z - (\delta Z - \phi \delta Y), Z_0^* = Z_0 + \phi \delta Y.$$

Следовательно, вариация LDB является пропорциональной составляющей Y измерений вариометра MV. Если Z_0 считается постоянной, возможно рассчитать значение ϕ из

$$\phi = \frac{Z_0^* - Z_0}{\delta Y}$$

Однако Z_0 не является напрямую доступным. Одним решением является выполнение измерения двойной амплитуды колебаний в Z_0^* и δY , в которых колебания необязательно отсеиваются или сглаживаются во избежание помех измерения

$$t_1 = t \mid Z_0^*(t_1) = \max(Z_0^*(t)), t_2 = t \mid Z_0^*(t_2) = \min(Z_0^*(t)), \phi \approx \frac{Z_0^*(t_1) - Z_0^*(t_2)}{\delta Y(t_1) - \delta Y(t_2)}.$$

На фиг. 9b приведен пример измерения исходной линии Z_0 составляющей Z поля, показывающей ошибку нивелирования в направлении восток-запад. В частности, на фиг. 9b показан случай ошибки нивелирования в 5° в направлении восток-запад. Вариации в исходных линиях, не учитывающих поправку Z_0 (в нанотесла, нТл) (исходная линия, не учитывающая поправку), и в исходных линиях, учитывающих поправку (исходная линия, учитывающая поправку), показаны за трехдневный период (ось x показывает дни).

Случай обсерватории с любой ориентацией.

В случае вариометра с любой ориентацией один возможный алгоритм представлен на фиг. 10. Он заключается в последовательном применении матриц вращения R_x и R_y , определяющих вращение вокруг оси X и оси Y, соответственно, для того чтобы математически исправить ось Z. Эти виртуальные вращения определяются для того, чтобы минимизировать определенный коэффициент, такой как вариация Z_0^* или ковариация Z_0^* и δY или δX или комбинация обеих. Например, два параметра, которые следует минимизировать, могут быть определены следующим образом:

$$\zeta_{ZY} = \sqrt{\text{VAR}(Z_0^*)^2 + \text{COV}(Z_0^*, \delta Y)^2}$$

$$\zeta_{ZX} = \sqrt{\text{VAR}(Z_0^*)^2 + \text{COV}(Z_0^*, \delta X)^2}$$

где $\text{COV}(A, B)$ является ковариацией A и B. Затем применяется матрица вращения, определяющая вращение вокруг оси Z для того, чтобы минимизировать вариацию X_0^* или Y_0^* или ковариацию этих LDB с δY или δX или комбинацию этих параметров. Для корректировки масштабных коэффициентов до или после поправок, вносимых в ориентацию, может быть применен схожий процесс. Весь алгоритм может включать множество итераций.

Случай обсерватории с конфигурацией DFI.

Вариометр MV измеряет вариации в компонентах поля, соответствующие системе сферических координат. Вариометр MV измеряет вариации в локальном магнитном поле в трех ортогональных направлениях, один из которых направлен параллельно магнитному полю и измеряет его силу таким же образом, что и конфигурации в декартовой системе координат. Два других направления расположены в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. В частности, направление, позволяющее выполнить относительное измерение D, расположено в горизонтальной плоскости, которая перпендикулярна магнитному полю, тогда как направление, позволяющее выполнить измерение I, расположено на магнитном меридиане. Эти две оси регистрируют проекцию магнитного поля (H для измерения D и F для измерения I).

Преобразование, схожее с тем, что применяется во время абсолютного измерения D и I, в таком случае позволяет преобразовать остаток в угловое значение.

Точно так же, как и для конфигурации в декартовой системе координат, измерения MV могут быть нарушены ошибкой, обусловленной масштабным коэффициентом. Затем для их корректировки применяется схожая процедура, а именно: выполнение измерений LDB с большой частотой (например, каждый час) и корректировка масштабного коэффициента (относительной) составляющей для того, чтобы минимизировать вариацию в ее LDB. Может быть использован коэффициент линейной корреляции.

Ошибка в выравнивании MV приводит к результату, который зависит от измеряемой составляющей. Для F и I результат не является критическим, так как проецируется само общее поле F. Поэтому соотношение относится ко второму порядку. В отличие от этого при относительном измерении D используют проекцию H (чувствительная ось в горизонтальной плоскости). Ошибка горизонтальности вызывает проекцию составляющей Z поля. Получают зависимость LDB, зависящую от $F \sin(I)$. Поэтому корректировка заключается в определении корреляции между вычисленной составляющей $Z = F \sin(I)$ и LDB D.

Случай обсерватории в конфигурации HDZ.

Вариометр MV измеряет вариации в составляющих поля, соответствующих системе цилиндрических координат. Он может считаться промежуточным элементом между двумя предыдущими. В случае любой ориентации MV может быть сделано обобщение.

Изобретение описано со ссылкой на конкретные варианты осуществления, которые являются исключительно иллюстративными и не должны считаться ограничивающими. В целом, настоящее изобретение не ограничивается примерами, показанными и/или описанными выше. В частности, настоящее изобретение также относится к комбинациям технических отличительных признаков вариантов осуществления, приведенных выше. Использование глаголов "содержать", "вмещать", "включать" или любых других вариантов и их спряжений никоим образом не может исключать наличия других элементов, помимо упомянутых. Использование единственного числа для введения элемента не исключает наличия множества этих элементов. Ссылочные позиции в пунктах формулы не ограничивают их объема.

Обобщая все вышесказанное, изобретение может также быть описано следующим образом.

Автономная магнитная обсерватория 200, которая содержит скалярный магнитометр MS для измерения модуля вектора F напряженности локального магнитного поля, угловой магнитометр MA для измерения направления вертикали V, направления географического севера N и направления вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, вариометр MV для измерения трех вариаций в векторе $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля, часы 201 и контроллер 202. В обсерватории контроллер выполнен с возможностью управления и осуществления контроля над ориентацией датчика для получения измерений вариометра MV, скалярного магнитометра MS, углового магнитометра MA и вариометра MV и для обработки полученных измерений для автоматического получения вектора $\vec{F}$ напряженности локального магнитного поля и погрешностей в измерениях, связанных с каждым средством измерения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Магнитная обсерватория (200) для измерения вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля, содержащая:

а) скалярный магнитометр (MS) для получения абсолютного измерения модуля вектора (F) напряженности локального магнитного поля;

б) угловой магнитометр (MA), содержащий:

1) первый держатель (320), выполненный с возможностью ориентации вокруг первой оси вращения, называемой главной осью (321) вращения, позволяющей получить горизонтальную ориентацию первого ориентируемого держателя (320), причем указанный первый ориентируемый держатель (320) содержит:

i) главный двигатель (322) для изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) вокруг главной оси (321);

ii) второй держатель (310), выполненный с возможностью ориентации вокруг второй оси вращения, называемой вторичной осью (311) вращения, позволяющей получить вертикальную ориентацию второго ориентируемого держателя (310), ортогональной главной оси (321), причем указанный второй ориентируемый держатель (310) содержит вспомогательный двигатель (312) для изменения вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя (310) вокруг вторичной оси (311) и магнитный датчик (323) для измерения направления вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля;

2) средство (340) для управления главным и вспомогательным двигателями (322 и 312);

3) устройство (350) для измерения и получения по углу горизонтальной и вертикальной ориентации первого и второго ориентируемых держателей (320, 310);

с) магнитный вариометр (MV), который регистрирует вариации в трех математически независимых составляющих вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля;

д) часы (201),

отличающаяся тем, что первый ориентируемый держатель (320) углового магнитометра (МА) дополнительно содержит датчик (313) угла наклона;

второй ориентируемый держатель (310) углового магнитометра (МА) дополнительно содержит устройство (324), указывающее на север;

обсерватория содержит контроллер (202), выполненный с возможностью:

а) автоматического управления главным двигателем (322) и вспомогательным двигателем (312);

б) управления ориентацией:

1) датчика (313) угла наклона для измерения направления вертикали (V);

2) устройства (324), указывающего на север, для измерения направления географического севера (N);

3) магнитного датчика (323) для измерения направления вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля;

с) получения:

1) углов направления вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля по отношению к географическому северу (N) и к вертикали (V) в зависимости от горизонтальной и вертикальной ориентации первого и второго ориентируемых держателей, ориентации которых измеряются с помощью устройства (350) для измерения и получения по углу;

2) вариаций в трех математически независимых составляющих вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля, которые измеряются с помощью вариометра (MV);

3) значений модуля вектора (F) напряженности локального магнитного поля, которые измеряются с помощью скалярного магнитометра (MS);

д) обработки данных, полученных на этапе с), для автоматического получения вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля и погрешностей в измерениях, связанных с каждым средством измерения.

2. Обсерватория по п.1, отличающаяся тем, что упомянутый датчик (313) угла наклона установлен на первом ориентируемом держателе (320) или на втором ориентируемом держателе (310).

3. Обсерватория по п.1, отличающаяся тем, что первый и второй ориентируемые держатели, главный и вспомогательный двигатели, устройство (324), указывающее на север, датчик угла наклона, средство (340) для управления главным и вспомогательным двигателями и устройство (350) для измерения и получения по углу образованы немагнитными компонентами, определенными таким образом, что магнитная восприимчивость материалов находится в диапазоне от -1 до 1, предпочтительно от -10^{-1} до 10^{-1} и более предпочтительно от -10^{-3} до 10^{-3} .

4. Обсерватория по п.3, отличающаяся тем, что немагнитные компоненты представляют собой материалы из следующего списка: керамика, алюминий, сплав Агсар, титан, медь, эрталон, нейлон, Ertacetal, полиэфирэфиркетон.

5. Обсерватория по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что скалярный магнитометр (MS) относится к одному из следующих типов: протоновый магнитометр, магнитометр с эффектом Оверхаузера, квантовый магнитометр, магнитометр с оптической накачкой.

6. Обсерватория по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что магнитный датчик (323) относится к одному из следующих типов: феррозондовый магнитометр, магнитометр Fluxset, электрическая цепь в состоянии вращения или скалярный магнитометр, поляризованный магнитным устройством.

7. Обсерватория по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что устройство (324), указывающее на север, относится к одному из следующих типов: глобальная навигационная спутниковая система, глобальная система определения местоположения, целеуказание, указание на небесное тело, гироскоп, детектор абсолютного вращения, поляризация по солнечному свету.

8. Обсерватория по любому из предыдущих пунктов, содержащая множество немагнитных опорных плит, предпочтительно изготовленных из бетона, поддерживающих по меньшей мере один из следующих элементов: скалярный магнитометр (MS), угловой магнитометр (МА), вариометр (MV), часы (201), контроллер (202), при этом немагнитные опорные плиты имеют средние размеры [толщина, ширина, длина] в диапазоне от [1, 10, 10] см до [6, 10, 10] м, предпочтительно от [10, 20, 20] см до [1, 2, 2] м, более предпочтительно от [15, 25, 25] см до [0,25, 0,5, 0,5] м и отстоят друг от друга на среднее расстояние в диапазоне от 0 до 10 м, предпочтительно от 1 до 6 м и более предпочтительно от 2 до 4 м.

9. Обсерватория по п.8, содержащая по меньшей мере одно немагнитное укрытие, окружающее множество опорных плит и содержащее изолированную стенку, средняя толщина которой варьирует в диапазоне от 1 до 60 см, предпочтительно от 2 до 30 см, более предпочтительно от 5 до 10 см, при этом по меньшей мере одно магнитное укрытие защищает по меньшей мере один из следующих элементов: скалярный магнитометр (MS), угловой магнитометр (МА), вариометр (MV), часы (201), контроллер (202).

10. Способ получения вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля с помощью магнитной обсерватории по любому из предыдущих пунктов, включающий следующие этапы:

а) контроллер (202) получает измерения модуля указанного вектора F напряженности локального магнитного поля, и эти измерения выполняются с помощью скалярного магнитометра (MS) в разные мо-

менты времени t_i ;

b) контроллер (202) получает измерения трех математически независимых составляющих вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля, dU , dV , dW , и эти измерения выполняются с помощью вариометра (MV) в разные моменты времени t_i ;

c) контроллер (202) управляет главным двигателем (322) для того, чтобы изменить горизонтальную ориентацию первого ориентируемого держателя (320), и в зависимости от показаний датчика угла наклона измеряет вертикальное направление V ;

d) контроллер (202) управляет главным двигателем (322) и вспомогательным двигателем (312) для того, чтобы изменить горизонтальную ориентацию первого ориентируемого держателя (320) и вертикальную ориентацию второго ориентируемого держателя (310), и в зависимости от показаний устройства (324), указывающего на север, измеряет направление географического севера N ;

e) контроллер (202) управляет главным и вспомогательным двигателями для того, чтобы изменить горизонтальную и вертикальную ориентации углового магнитометра (МА), и в зависимости от показаний магнитного датчика (323), показания которого получены в разные моменты времени t_i , измеряет два угла D^* и I^* , соответствующие направлению вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля;

f) контроллер (202) вычисляет абсолютные значения двух углов из направлений, полученных на этапах c)-e) таким образом, что

$$D = D^* - N \\ \text{и } I = I^* - V;$$

g) контроллер (202) вычисляет исходные линии вариометра (MV) в момент времени t , который является средним значением разных моментов времени t_i , используя абсолютный модуль вектора F напряженности локального магнитного поля, полученный как на этапе a), и углы, полученные как на этапе f);

h) контроллер (202) выполняет калибровку масштабных коэффициентов каждой математически независимой составляющей вариометра (MV);

i) контроллер (202) выполняет калибровку ортогональности и ориентации в пространстве трех математически независимых составляющих вариометра (MV) и вычисляет эйлеровы матрицы E поворота;

j) контроллер (202) вычисляет значение вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля путем осуществления следующих этапов:

1) получение ориентированных измерений, применяя эйлеровы повороты E , которые были получены на этапе i), к трем измерениям вариометра (MV): dU , dV и dW ;

2) получение измерений, подлежащих масштабированию, путем умножения трех ориентированных измерений вариометра (MV) на соответствующие масштабные коэффициенты, полученные на этапе h);

3) получение трех составляющих вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля путем добавления исходных линий к трем ориентированным и масштабируемым измерениям.

11. Способ по п.10, отличающийся тем, что на этапе e) контроллер (202) измеряет два угла D^* и I^* путем осуществления следующих этапов:

a) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320), пока магнитный датчик (323) не укажет на нуль, и получение первого угла D^* ;

b) изменение вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя (310), пока магнитный датчик (323) не укажет на нуль, и получение второго угла I^* .

12. Способ по любому из пп.10 и 11, отличающийся тем, что контроллер (202) вычисляет исходные линии вариометра (MV), исходя из трех измерений вариометра (MV): dU , dV и dW , абсолютного модуля вектора F напряженности локального магнитного поля, двух углов, характеризующих направление вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля: угла наклона I и угла склонения D , и необязательно функций g_U , g_V , g_W , что позволяет выполнить замену координат D , F , I координатами U , V , W , и контроллер (202) вычисляет исходные линии U_0 , V_0 , W_0 , используя

$$U_0 = g_U(F, D, I) - dU$$

$$V_0 = g_V(F, D, I) - dV$$

$$W_0 = g_W(F, D, I) - dW.$$

13. Способ по любому из пп.10-12, отличающийся тем, что контроллер (202) выполняет калибровку масштабных коэффициентов каждой составляющей вариометра (MV) путем осуществления следующих этапов:

a) измерение амплитуд вариаций в исходных линиях по отношению к амплитудам сигналов каждой из трех составляющих вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля в течение предварительно установленного периода времени;

b) умножение трех измерений вариометра (MV): dU , dV и dW на поправочные коэффициенты, мас-

штабные коэффициенты f_U, f_V, f_W ;

с) вычитание значений с учетом поправок и вычисление исходных линий, используя

$$U_0 = g_U(F, D, I) - f_U \cdot dU$$

$$V_0 = g_V(F, D, I) - f_V \cdot dV$$

$$W_0 = g_W(F, D, I) - f_W \cdot dW$$

d) увеличение или уменьшение соответствующих масштабных коэффициентов для уменьшения вариаций в соответствующих исходных линиях;

е) корректировка измерений вариометра (MV) путем умножения на соответствующие масштабные коэффициенты;

этапы а)-d) могут быть повторены до тех пор, пока увеличение или уменьшение в масштабных коэффициентах не будет меньше, чем заданная величина.

14. Способ по любому из пп.10-13, отличающийся тем, что контроллер (202) выполняет калибровку ортогональности и ориентации в пространстве трех математически независимых составляющих вариометра (MV) и вычисляет эйлеровы матрицы E поворота путем осуществления следующих этапов:

а) изучение вариации в исходной линии составляющей как функции амплитуды сигнала других составляющих в течение заданного периода времени;

б) вычисление эйлеровых матриц E поворота и корректировка ориентации до тех пор, пока вариация в исходной линии не будет меньше, чем заданное значение.

15. Способ по п.10, отличающийся тем, что этап е) заключается в следующем: контроллер (202) управляет главным и вспомогательным двигателями для того, чтобы изменить горизонтальную и вертикальную ориентации углового магнитометра (MA), и в зависимости от показаний магнитного датчика (323), показания которого получены в разные моменты времени t_i , измеряет два угла D^* и I^* , соответствующие направлению вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля путем осуществления следующих этапов:

а) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) таким образом, что магнитный датчик (323) показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации D1 первого ориентируемого держателя (320), соответствующей этому измерению;

б) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) на 180° и корректировка горизонтальной ориентации таким образом, что магнитный датчик (323) показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации D2 первого ориентируемого держателя (320), соответствующей этому измерению;

с) изменение вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя (310) на 180° и корректировка горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) таким образом, что магнитный датчик (323) показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации D3 первого ориентируемого держателя (320), соответствующей этому измерению;

д) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) на 180° и корректировка горизонтальной ориентации таким образом, что магнитный датчик (323) показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации D4 первого ориентируемого держателя (320), соответствующей этому измерению;

е) вычисление первого угла, соответствующего горизонтальному направлению локального магнитного поля, путем вычисления среднего значения четырех измерений:

$$D^* = (D1 + D2 + D3 + D4)/4;$$

ф) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) к направлению D^*-90° ;

г) выполнение этапов а)-с), на которых горизонтальная и вертикальная ориентации заменены местами и на которых роли первого и второго ориентируемых держателей (320 и 310) заменены местами, и, таким образом, получение ориентации I1, I2, I3;

h) изменение горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) к направлению D^*-90° и корректировка вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя (310) таким образом, что магнитный датчик (323) показывает нулевое значение измерения, и получение ориентации I4 второго ориентируемого держателя (310), соответствующей этому измерению;

и) вычисление второго угла, соответствующего второму направлению локального магнитного поля, путем вычисления среднего значения четырех измерений:

$$I^* = (I1 + I2 + I3 + I4)/4$$

16. Способ по любому из пп.10-15, отличающийся тем, что устройство (324), указывающее на север, представляет собой указывающее устройство типа детектора абсолютного вращения, и при этом этап d) по п.10 заключается в следующем: контроллер (202) управляет главным двигателем (322) и вспомогательным двигателем (312) с целью изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя

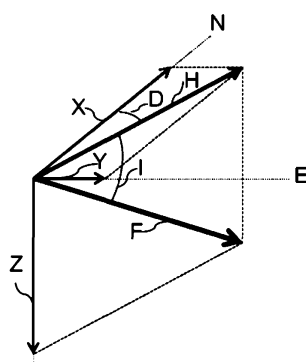
жателя (320) и вертикальной ориентации второго ориентируемого держателя (310), и в зависимости от показаний устройства (324), указывающего на север, измеряет направление географического севера N путем изменения горизонтальной ориентации первого ориентируемого держателя (320) до тех пор, пока детектор абсолютного вращения не укажет на нулевое значение измерения, и получает ориентацию N первого ориентируемого держателя (320), соответствующую этому измерению.

17. Способ по любому из пп.10-16, отличающийся тем, что устройство (324), указывающее на север, представляет собой указывающее устройство типа детектора абсолютного вращения, и при этом этап d) по п.10 включает этапы а)-е) по п.15, этапы, на которых магнитный датчик (323) заменен детектором абсолютного вращения, а ориентации D1, D2, D3, D4 и D* заменены на N1, N2, N3, N4 и N.

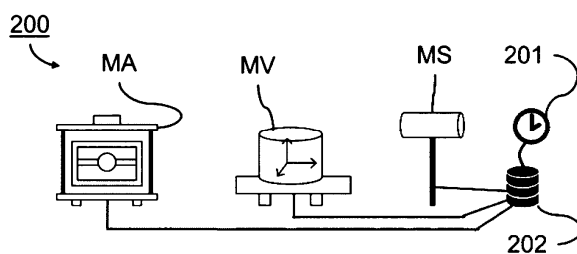
18. Способ по любому из пп.10-17, отличающийся тем, что скалярный магнитометр (MS) и вариометр (MV) выполняют измерения с частотой от 0,01 до 100 Гц, предпочтительно от 0,05 до 10 Гц и более предпочтительно от 0,1 до 1 Гц.

19. Способ по любому из пп.10-18, отличающийся тем, что измерения ориентации вектора ($\vec{F}$) напряженности локального магнитного поля выполняют с частотой в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-2} Гц, предпочтительно в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-3} Гц и более предпочтительно в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-4} Гц.

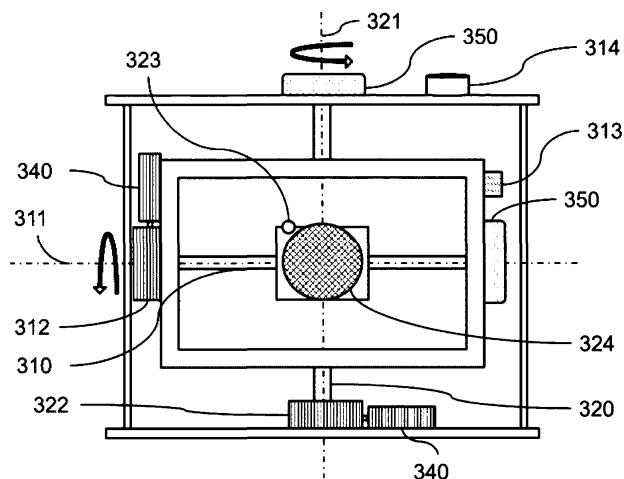
20. Обсерватория по любому из пп.1-9, отличающаяся тем, что она реализует способ по любому из пп.10-19.



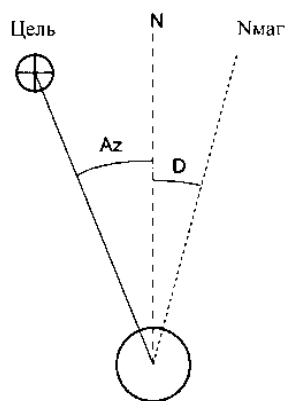
Фиг. 1



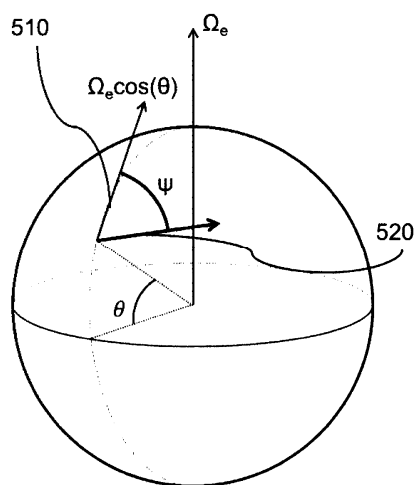
Фиг. 2



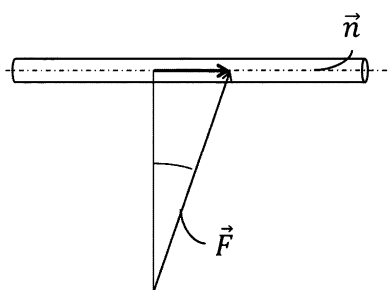
Фиг. 3



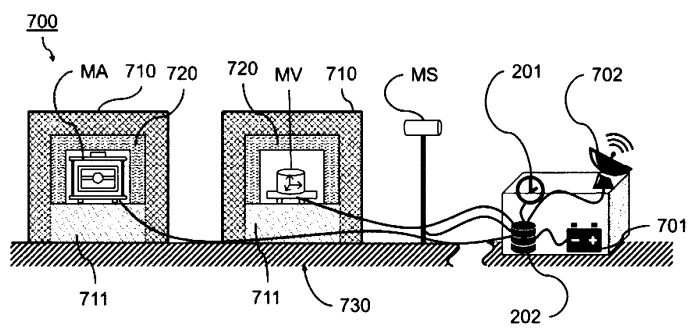
Фиг. 4



Фиг. 5



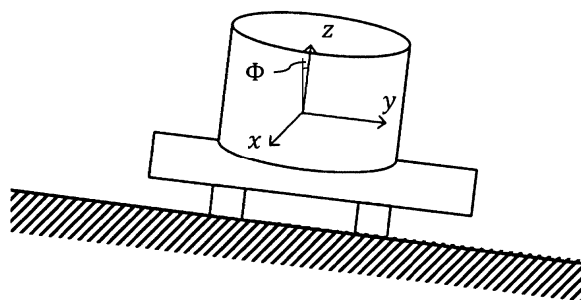
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9а

