

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1177-1184

УДК 531.746, 550.832

Использование магнитного градиентометра в скважинном инклинометре с целью компенсации внешних помех

Олег Валерьевич Гасанов¹, Виталий Николаевич Ситников²,
Вадим Рафисович Хаматдинов³, Илья Викторович Гринев⁴✉,
Александр Борисович Королев⁵

^{1,2,3,4,5} ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, 170033, Российская Федерация

¹ gasanov.o@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6275-688X>

² v.sitnikov@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0226-3297>

³ hvadim@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3257-0317>

⁴ i.grinev@karotazh.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-9078-4792>

⁵ korolev@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1290-574X>

Аннотация

Введение. В процессе измерений магнитного азимута оси ствола скважины расчеты проводятся на основе компонент суперпозиции магнитного поля Земли и паразитных полей остаточной намагниченности сборки геофизических приборов и бурильной колонны. В условиях высоких широт горизонтальная составляющая геомагнитного поля критически мала. Это приводит к тому, что даже слабые по величине, около 1 % от величины геомагнитного поля, паразитные поля приводят к погрешностям измерения магнитного азимута оси скважины в 4° и более. В известных исследованиях представлено большое количество методов борьбы с данным влиянием. Однако, почти все они требуют либо дополнительного оборудования и предварительных измерений, либо знания точных величин модуля и наклона геомагнитного поля для места измерений. В результате возникает проблема создания метода компенсации, который бы не требовал предварительных замеров параметров паразитного поля или модуля и наклона геомагнитного поля. **Метод.** Предложен метод использования в инклинометре дополнительного магнитометра для измерения градиента суперпозиционного магнитного поля. На основе имитационного моделирования по величине полученного градиента подбирается эквивалентный по влиянию источник магнитного поля в виде кругового витка с током. Далее из показаний опорного магнитометра вычитается влияние от подобранного витка. В лабораторных экспериментах в качестве источников паразитных полей использовались кольцевые неодимовые магниты (три варианта источников с разной магнитной индукцией), располагающиеся на оси инклинометра. В качестве магнитного градиентометра применены два магнитометрических датчика с расстоянием между магнитометрами 0,307 м. **Основные результаты.** В экспериментах, при помощи разработанного алгоритма, были подобраны параметры витков с током, эквивалентных источникам по магнитному влиянию. Это позволило компенсировать показания опорного магнитометра и повысить точность измерений магнитного азимута с: $-1^{\circ}15'36''$ (источник 1), $-3^{\circ}9'36''$ (источник 2) и $12^{\circ}30'36''$ (источник 3) до $\pm 0^{\circ}39'$ для случая использования всех источников. В эксперименте величины магнитной индукции источников в месте расположения опорного магнитометра были равны: 0,42 %, 1,59 % и 5,60 % от величины геомагнитного поля соответственно. **Обсуждение.** Предложенный метод позволяет повысить точность измерений азимута без замера на скважине параметров паразитного и геомагнитного полей. Кроме того, использование метода дает возможность уменьшить длины охранного кожуха и немагнитных вставок по обе стороны от инклинометра в случае бурения. Таким образом, метод может быть реализован в составе датчика, осуществляющего вычисление и компенсацию паразитных полей непосредственно во время каротажа или бурения.

Ключевые слова

инклинометр, геонавигация, каротаж, навигация во время бурения, геофизическая сборка, бурильная колонна, поле остаточной намагниченности, увеличение точности расчета азимута

Ссылка для цитирования: Гасанов О.В., Ситников В.Н., Хаматдинов В.Р., Гринев И.В., Королев А.Б. Использование магнитного градиентометра в скважинном инклинометре с целью компенсации внешних помех // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1177–1184. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1177-1184

© Гасанов О.В., Ситников В.Н., Хаматдинов В.Р., Гринев И.В., Королев А.Б., 2025

Using a magnetic gradiometer in a borehole inclinometer to compensate for external magnetic interference

Oleg V. Gasanov¹, Vitaly N. Sitnikov², Vadim R. Khamatdinov³,
Ilya V. Grinyov⁴✉, Alexander B. Korolyov⁵

^{1,2,3,4,5} LTD Neftegazgeofizika, Tver, 170033, Russian Federation

¹ gasanov.o@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6275-688X>

² v.sitnikov@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0226-3297>

³ hvadim@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3257-0317>

⁴ i.grinev@karotazh.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-9078-4792>

⁵ korolev@karotazh.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1290-574X>

Abstract

In measurements of the magnetic azimuth of the borehole axis, calculations are based on the superposition of the Earth's magnetic field and parasitic fields from the remanent magnetization of the geophysical tool assembly and the drill string. At high latitudes the horizontal component of the geomagnetic field is very small. As a result, even weak parasitic fields — on the order of 1 % of the geomagnetic field — can cause azimuth errors of 4° or more. Many methods to mitigate this effect have been reported in the literature. However, almost all of them require either additional equipment and preliminary measurements, or knowledge of the exact values of the magnitude and inclination of the geomagnetic field at the survey location. In connection with all of the above, there is a problem of creating a compensation method that would not require preliminary measurements of the parameters of the parasitic field or the modulus and inclination of the geomagnetic field. This paper proposes using an additional magnetometer in the inclinometer to measure the gradient of the superpositional magnetic field. From simulation, and using the measured gradient, an equivalent magnetic source in the form of a circular current loop is determined. The calculated field of this loop is then subtracted from the reference magnetometer readings. In the laboratory experiments, ring neodymium magnets (three variants with different magnetic flux densities) placed on the inclinometer axis were used as parasitic-field sources. A magnetic gradiometer was formed by two magnetometer sensors spaced 0.307 m apart. In experiments, the developed algorithm identified parameters of current loops equivalent to the sources in terms of magnetic effect. This enabled compensation of the reference magnetometer readings and improved azimuth accuracy from $-1^{\circ}15'36''$ (source 1), $-3^{\circ}9'36''$ (source 2) and $+12^{\circ}30'36''$ (source 3) to $\pm 0^{\circ}39'$ for all sources. In the experiment the field magnitudes at the reference magnetometer location were 0.42 %, 1.59 % and 5.60 % of the geomagnetic field, respectively. The proposed method increases azimuth measurement accuracy without requiring measurements of parasitic or geomagnetic field parameters. In addition, the use of the method allows reducing the length of nonmagnetic collars on both sides of the inclinometer during drilling. Thus, the method can be implemented in a sensor that computes and compensates for parasitic fields in real time during logging or drilling.

Keywords

inclinometer, geosteering, logging, measurement-while-drilling (MWD) navigation, geophysical tool assembly, drill string, remanent magnetization, azimuth accuracy improvement

For citation: Gasanov O.V., Sitnikov V.N., Khamatdinov V.R., Grinyov I.V., Korolyov A.B. Using a magnetic gradiometer in a borehole inclinometer to compensate for external magnetic interference. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1177–1184 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1177-1184

Введение

В задачах скважинной навигации, опирающейся на гравитационное и геомагнитное (ГМП) поля, широко распространена проблема, связанная с влиянием на измеряемый магнитный азимут паразитных полей остаточной намагниченности (ПОН) сборки геофизических приборов и бурильных труб, которые используются в комплексе со скважинным инклинометром. Данное влияние особенно выражено в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах.

Приведенная проблема, в силу своей актуальности, решается большим количеством аппаратных, программных и комбинированных методов. В случае навигации во время бурения инклинометр разносится в пространстве с источниками ПОН при помощи немагнитных труб необходимой длины [1]. В ряде случаев может использоваться размагничивание бурильного оборудования до [2] или непосредственно в процессе [3] проведения работ в скважине. Применяется также метод компенсации помех посредством съема девиацион-

ных кривых влияния на азимут ПОН компоновки низа бурильной колонны [4, 5], а также через измерение, моделирование и компенсацию поля компоновки низа бурильной колонны [6]. Измерение осевой составляющей суммарного ПОН компоновки низа бурильной колонны и бурильной колонны до и после наращивания сборки предлагается в работе [7].

В большинстве методов компенсации ПОН, представленных в научных работах, учитывается только осевая составляющая ПОН. В частности, подобный подход, на основе известных для места проведения работ модуля и угла наклона ГМП, используется в широко известном «методе коротких утяжеленных бурильных труб» [8–10]. Однако, как известно, глобальные магнитные модели, применяемые в данном методе, могут давать существенные ошибки в определении среднесуточных локальных значений параметров ГМП [11]. Более того, суточные вариации, в том числе модуля и угла наклона ГМП, существенно возрастают с увеличением широты места исследований [12] и могут достигать до сотен нанотесла и десятых градуса

даже в спокойные геомагнитные дни в условиях севера Сибири и Арктического шельфа.

Учет только осевой составляющей ПОН является существенным недостатком указанных методов, так как, по результатам практических наблюдений, вектор ПОН в месте расположения магнитометров часто не направлен по оси сборки, а в некоторых случаях угол расхождения может достигать до десятков градусов [13].

В ряде работ предложено минимизировать влияние ПОН путем комбинирования магнитометрических и гироскопических датчиков [14–16]. Данное направление является перспективным, однако, в силу высокой стоимости гироскопов, существенно увеличивает стоимость инклинометрической аппаратуры.

Также решением проблемы является исследование скважины отдельным инклинометром, но и в данном случае происходит удорожание геофизических работ в связи с увеличением объема спуско-подъемных операций. В случае измерений на бурильных трубах данный подход не только не работает, но может приводить к еще большим влияниям, так как инклинометр приближается к источнику ПОН.

Перспективным методом решения проблемы представляется апостериорная обработка данных инклинометрии [17]. Недостатком же данного метода является то, что скорректированные данные становятся доступными только после сбора необходимого количества данных, а полный анализ возможен только после окончания скважинных работ.

В то же время в геофизике широко используется двухзондовый метод измерений, когда электрическое, электромагнитное или радиационное поля измеряются на двух расстояниях от источника. При фиксированном расстоянии между точками измерений и известных параметрах источника, по градиенту поля вычисляются параметры окружающих прибор пород.

В том случае, если два магнитометра применяются в инклинометре, по градиенту магнитного поля необходимо вычислить не параметры слагающих стенки скважины пород, а параметры самих источников суперпозиционного поля. Важно заметить, что данный подход осуществим только в том случае, если стенки скважины слагают породы со слабо выраженными магнитными свойствами. Кроме того, как в случае транзитного скважинного инклинометра, так и в случае забойного датчика, источников ПОН — два: от нижней и верхней частей сборки.

В работах [18, 19] предложено использование двух магнитометров с измерением градиента и последующей компенсацией магнитного азимута. Однако, как и в случае «метода коротких утяжеленных бурильных труб» [8–10], корректируется только осевая компонента поля, измеряемого опорным магнитометром.

В настоящей работе представлен метод, который не требует знания модуля и угла наклона ГМП в месте измерений. Кроме того, проводится расчет не только осевой, но и радиальной составляющей ПОН. Подход базируется на том предположении, что в качестве источника ПОН можно рассматривать одиночный круговой виток с током.

Метод

Постановка задачи. Располагающийся в сборке геофизических приборов инклинометр измеряет не ГМП, а суперпозицию ГМП и ПОН. Это приводит к существенным погрешностям измерения инклинометром магнитного азимута оси скважины. Отметим, что ПОН можно с необходимой для практических целей точностью аппроксимировать магнитным влиянием одиночного кольцевого витка с током (рис. 1). Определение ориентации и силы тока в таком эквивалентном витке — задача, которая может быть решена на основе показаний двух трехосевых магнитометров (M_1 и M_2 (рис. 1 и рис. 2, а, с)), располагающихся на известном расстоянии друг от друга на оси прибора. Ближайший к нижнему концу инклинометра магнитометр (M_2) является опорным, так как его показания корректируются на основе вычисленных параметров источника ПОН и используются при расчете магнитного азимута.

Таким образом, цель моделирования — повышение точности расчета магнитного азимута инклинометра.

Для достижения указанной цели необходимо согласование показаний магнитометров — минимизация разности показаний при разных ориентациях прибора без внешних магнитных воздействий (отдельная серьезная задача, которая не рассматривается в настоящей работе). Далее требуется вычисление параметров витка с током, который имитирует влияние ПОН, по измеренной разности показаний магнитометров. В результате проводится корректировка показаний опорного магнитометра и перерасчет на их основе магнитного азимута (погрешность не должна превышать $\pm 1^\circ 30'$ при комнатной температуре).

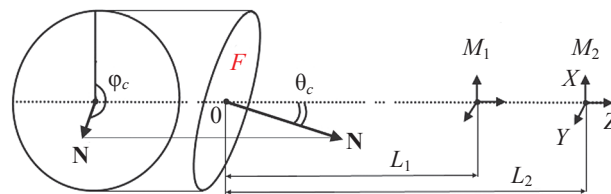


Рис. 1. Эквивалентный круговой виток F и его расположение относительно магнитометров M_1 и M_2 прибора.

Центр витка располагается в точке O (центре системы координат). Черными стрелками показан вектор нормали \mathbf{N} к плоскости витка, в левой части рисунка — осевая проекция витка, в правой части рисунка — направления осей в системе координат.

θ_c — угол между вектором нормали \mathbf{N} и осью Z системы координат; φ_c — угол между проекцией вектора нормали \mathbf{N} на плоскость XOY и осью X ; L_1 и L_2 — расстояния от центра витка до магнитометров

Fig. 1. Equivalent circular current loop F and its position relative to the device magnetometers M_1 and M_2 .

The black arrow indicates the loop normal vector \mathbf{N} . The left part of the figure shows the loop axial projection.

In the picture: θ_c — angle between the normal vector \mathbf{N} and the Z -axis of the coordinate system; φ_c — angle between the projection of the normal vector \mathbf{N} onto the XOY plane and the X -axis; L_1 and L_2 — distances from the center of the coil to the magnetometers

Проекция вектора магнитной индукции произвольно ориентированного кругового витка с током на оси координат в произвольной точке. Индукцию магнитного поля в вакууме проводника с постоянным током в точке с радиус-вектором $\mathbf{r}_0 = \{r_{x0}; r_{y0}; r_{z0}\}$ можно вычислить по закону Био–Савара–Лапласа

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\gamma} \frac{I[\mathbf{dr}(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r})]}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; \mathbf{r} — вектор, соответствующий точке интегрирования на контуре γ с током I ; \mathbf{dr} — вектор элемента контура.

Рассмотрим в качестве источника паразитного ПОН (1) круговой виток с током (рис. 1). Примем центр витка за начало координат. Зададим ориентацию плоскости витка в пространстве через вектор нормали \mathbf{N} к его плоскости.

В таком случае вектор, соответствующий точке интегрирования на контуре витка, можно задать как

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\varphi) = \{(R\cos\varphi; R\sin\varphi; 0)\mathbf{\Omega}\},$$

где R — радиус витка; φ — угол положения точки контура относительно оси X в плоскости XOY ; $\mathbf{\Omega} = \mathbf{\Omega}_Y(\theta_c)\mathbf{\Omega}_Z(\varphi_c)$ — матрица поворотов вокруг оси Y на угол θ_c :

$$\mathbf{\Omega}_Y(\theta_c) = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & 0 & \sin\theta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_c & 0 & \cos\theta_c \end{pmatrix};$$

вокруг оси Z на угол φ_c :

$$\mathbf{\Omega}_Z(\varphi_c) = \begin{pmatrix} \cos\varphi_c & -\sin\varphi_c & 0 \\ \sin\varphi_c & \cos\varphi_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Вектор элемента контура можно вычислить по формуле (ток течет по направлению вектора)

$$\mathbf{dr} = \{(r(\varphi + d\varphi) - r(\varphi))\mathbf{\Omega}\} = \{(-R\sin\varphi d\varphi; R\cos\varphi d\varphi; 0)\mathbf{\Omega}\}.$$

В общем виде $\mathbf{dr} = \{dr_x; dr_y; dr_z\}$. Вектор между точкой на проводнике и точкой измерений

$$\mathbf{r}_0 - \mathbf{r} = \{(r_{x0}; r_{y0}; r_{z0}) - (R\cos\varphi; R\sin\varphi; 0)\mathbf{\Omega}\}.$$

В общем виде $\mathbf{r}_0 - \mathbf{r} = \{r_x; r_y; r_z\}$.

Используя приведенные величины и формулу (1), можно ввести проекции вектора индукции от кругового витка на оси координат в точке измерений:

$$\begin{aligned} B_x(\mathbf{r}_0) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_y dr_z - r_z dr_y}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3}, \\ B_y(\mathbf{r}_0) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_z dr_x - r_x dr_z}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3}, \\ B_z(\mathbf{r}_0) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_x dr_y - r_y dr_x}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Проекция вектора индукции произвольно ориентированного кругового витка с током на оси двух магнитометров. Рассмотрим проекции поля кругового витка с током на оси двух магнитометров, расположенных на оси Z в точках $M_1 = (0, 0, L_1)$ и $M_2 = (0, 0, L_2)$ (рис. 1).

Введем обозначения: H_x, H_y, H_z — проекции поля, измеряемого магнитометрами; верхние индексы (M_1) и (M_2) — принадлежность компонент соответствующим магнитометрам. Тогда разности показаний по осям магнитометров, возникающие при внешнем воздействии, аппроксимированном витком с током (2), запишем в виде:

$$\begin{aligned} H_x^{(M_1)} - H_x^{(M_2)} &= B_x(M_1) - B_x(M_2), \\ H_y^{(M_1)} - H_y^{(M_2)} &= B_y(M_1) - B_y(M_2), \\ H_z^{(M_1)} - H_z^{(M_2)} &= B_z(M_1) - B_z(M_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Если подобраны параметры витка, удовлетворяющие (3), данные опорного (M_2) магнитометра могут быть скомпенсированы на величины влияния,

$$\begin{aligned} \hat{H}_x^{(M_2)} &= H_x^{(M_2)} - B_x(M_2), \\ \hat{H}_y^{(M_2)} &= H_y^{(M_2)} - B_y(M_2), \\ \hat{H}_z^{(M_2)} &= H_z^{(M_2)} - B_z(M_2). \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом полученных (4) значений $\hat{H}_x^{(M_2)}$, $\hat{H}_y^{(M_2)}$ и $\hat{H}_z^{(M_2)}$ вычислим скорректированный магнитный азимут прибора

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\hat{H}_x^{(M_2)} \sin\varphi_{Inc} + \hat{H}_y^{(M_2)} \cos\varphi_{Inc}}{\hat{H}_x^{(M_2)} \cos\theta_{Inc} \cos\varphi_{Inc} - \hat{H}_y^{(M_2)} \cos\theta_{Inc} \sin\varphi_{Inc} - \hat{H}_z^{(M_2)} \sin\theta_{Inc}} \right), \quad (5)$$

где θ_{Inc} и φ_{Inc} — зенитный и визирный углы инклинометра, вычисляемые на основе показаний акселерометров.

Проекция векторов индукции двух произвольно ориентированных круговых витков с током на оси двух магнитометров. В том случае, когда инклинометр используется в транзитном исполнении (не в конце сборки), на магнитометры будут оказывать влияние не один, а два источника ПОН (F_1 и F_2 на рис. 2, с, d). Источник 2 располагается в точке $S = (0; 0; L_3)$. В таком случае необходимо найти параметры двух эквивалентных источников, располагающихся сверху и снизу от магнитного градиентометра:

$$\begin{aligned} H_x^{(M_1)} - H_x^{(M_2)} &= B_x^{(F_1)}(M_1) + B_x^{(F_2)}(M_1 - S) - \\ &\quad - B_x^{(F_1)}(M_2) - B_x^{(F_2)}(M_2 - S); \\ H_y^{(M_1)} - H_y^{(M_2)} &= B_y^{(F_1)}(M_1) + B_y^{(F_2)}(M_1 - S) - \\ &\quad - B_y^{(F_1)}(M_2) - B_y^{(F_2)}(M_2 - S); \\ H_z^{(M_1)} - H_z^{(M_2)} &= B_z^{(F_1)}(M_1) + B_z^{(F_2)}(M_1 - S) - \\ &\quad - B_z^{(F_1)}(M_2) - B_z^{(F_2)}(M_2 - S). \end{aligned} \quad (6)$$

Случай двух источников ПОН соответствует использованию забойного датчика, в связи с чем приве-

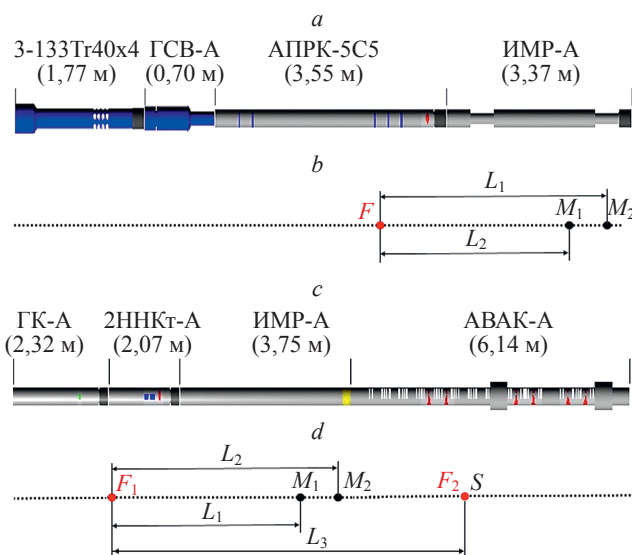


Рис. 2. Варианты расположения источников полей остаточной намагниченности (на примере геофизических сборок на буровом инструменте): концевое (а), (б) и транзитное (с), (д) использования инклинометра магниторезистивного (ИМП).

Нижний конец сборки — справа, буровой инструмент — слева от указанных сборок.

3-133Tr40x4 — переводник со сборки на буровой инструмент; ГСВ — головка свободного вращения. Приборы: АПРК-5С5 — радиоактивного; ГК — гамма; 2ННКт — двойного нейтронного; АВАК — волнового акустического каротажа. Добавка «-А» — прибор автономный

Fig. 2. Variants of RMF (Remanent Magnetization Field) source locations (example: geophysical tool assemblies on a drilling string): end placement (a), (b); transit placement of magnetoresistive inclinometer (MRI) (c), (d).

In the assemblies shown, the lower end is at the right and the drilling tool is at the left. Legend: 3-133Tr40x4 — sub from the assembly to the drilling tool; ГСВ — free-rotating head; АПРК-5С5 — radioactive tool; ГК — gamma; 2ННКт — dual neutron; АВАК — sonic logging. Suffix «-A» denotes an autonomous tool

денная (б) модель может быть использована во время бурения.

Описание средств для проведения эксперимента.

Эксперимент проводился с использованием двух инклинометрических датчиков БДИ-32 производства ООО «Нефтегазгеофизика», расположенных в одной трубе, размещенной на калибровочной установке. Расстояние между магнитометрами составляло 0,307 м ($L_2 - L_1$ на рис. 1).

Проверку проходил вариант с источником с одной стороны (рис. 1 и рис. 2, а, б). В качестве источников ПОН применены кольцевые неодимовые маг-

ниты, располагающиеся на оси трубы с датчиками. Использовались три магнита со следующими радиусами и расстояниями до точки M_1 (рис. 1): источник 1 и 2 — $R = 0,013$ м, $L_1 = 0,515$ м; источник 3 — $R = 0,023$ м, $L_1 = 0,481$ м.

Таким образом, в расчетном процессе осуществлялся подбор только ориентации (θ_c и φ_c (рис. 1)), направления и силы тока I витка. Ток витка подбирался из условия его минимального значения, удовлетворяющего критерию (3).

Основы алгоритма расчета параметров эквивалентного витка. Параметры ориентации и сила тока имитирующего ПОН витка подбирались методом золотого сечения таким образом, чтобы разности показаний реальных магнитометров в M_1 и M_2 совпали с моделируемыми разностями (3) в тех же точках. При этом вычисление проекций индукции поля от витка на оси магнитометров (2) производилось путем численного интегрирования.

Основные результаты

Параметры витков с током, имитирующих источники ПОН, приведены в таблице. Параметры были получены при помощи предложенного алгоритма.

Для демонстрации эффективности метода на рис. 3 приведены разности расчетных (5) и заданных на калибровочной установке значений магнитного азимута. Зенитные углы во время измерений: 30° и 90° . Значения азимутов 90° и 270° обусловлены тем, что именно при данных азимутах вектор ПОН направлен перпендикулярно вектору ГМП и, следовательно, его влияние ярко выражено [20]. Измерения проводились при разных визирных углах (углах разворота корпуса инклинометра вокруг своей оси).

Зелеными квадратами на рис. 3 указаны погрешности расчетных значений азимута без влияния ПОН. Как видно из графиков (синие круги), скорректированные на влияние ПОН, значения магнитного азимута (5) не отклонялись от заданных значений более чем на $0^\circ 39'$ в случае трех источников паразитного поля. Фактически, диапазон погрешностей после корректировки не отличался от диапазона погрешностей без влияния ПОН. В то же время максимальные погрешности измерения азимута без корректировки (красные треугольники) были следующими: $-1^\circ 15' 36''$ (источник 1), $-3^\circ 9' 36''$ (источник 2), $12^\circ 30' 36''$ (источник 3).

Несложно заметить, что погрешности при зенитных углах 30° (рис. 3, а, с, е) меньше погрешностей при зенитных углах 90° (рис. 3, б, д, ф). Это полностью укладывается в представленную модель влияния ПОН [20].

Таблица. Расчетные параметры витков с током, эквивалентных источникам ПОН

Table. Calculated parameters of current loops equivalent to Remanent Magnetization Field (RMF) sources

Номер источника	Модуль магнитной индукции источника в точке M_2 , нТл	Доля от ГМП, %	$\theta_c, ^\circ$	$\varphi_c, ^\circ$
1	216,87	0,42	$7^\circ 12' 36''$	$283^\circ 45' 36''$
2	811,34	1,59	$1^\circ 39' 36''$	$241^\circ 0' 36''$
3	2965,57	5,80	$5^\circ 37' 48''$	$284^\circ 39'$

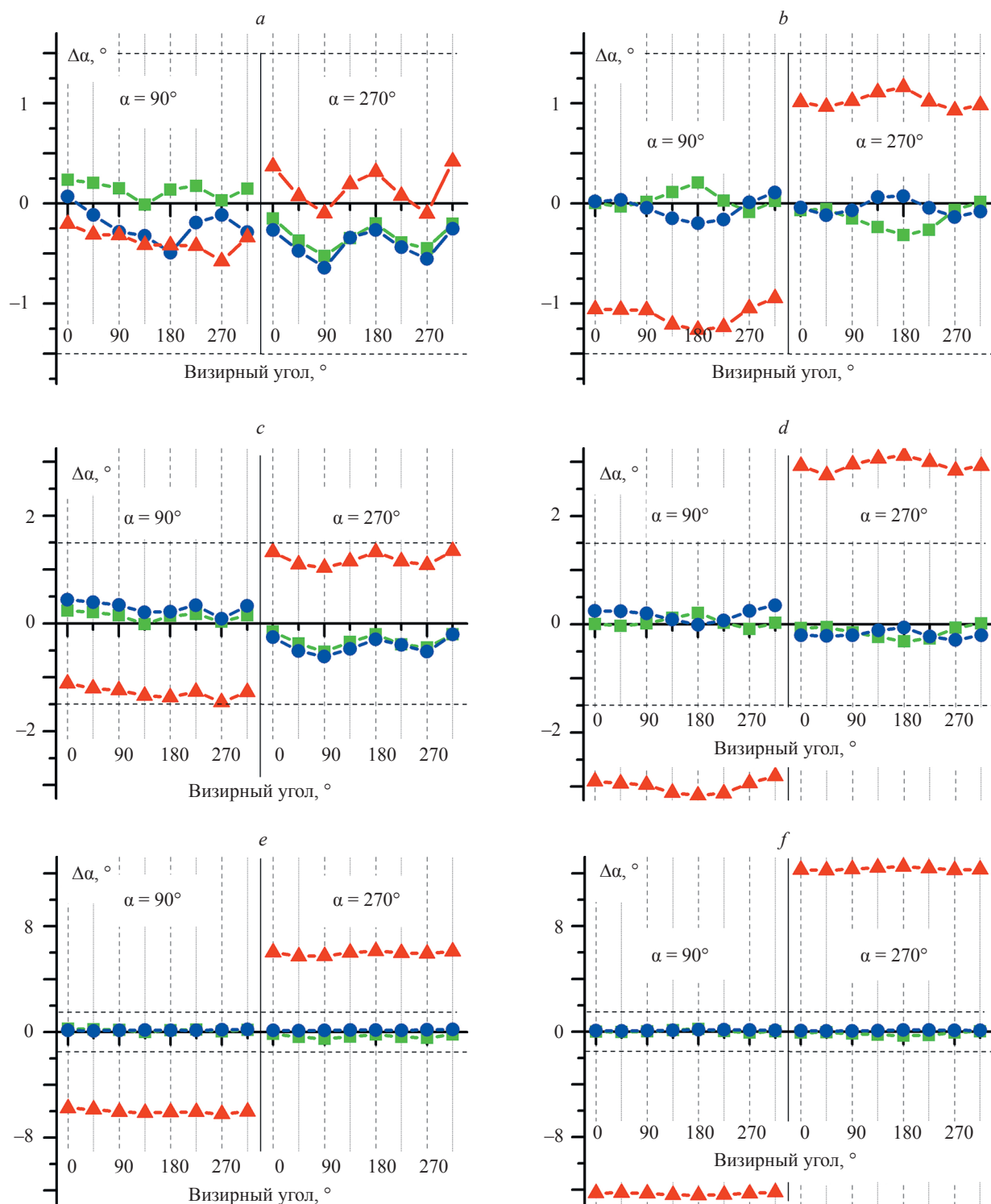


Рис. 3. Разности $\Delta\alpha$ расчетных и заданных на калибровочной установке значений магнитного азимута при разных визирных углах: без влияния поля остаточной намагниченности (зеленые квадраты), с влиянием поля остаточной намагниченности (красные треугольники) и с влиянием, скомпенсированным по алгоритму из настоящей работы (синие круги). Зенитные углы во время измерений: 30° (a, c, e); 90° (b, d, f). Пунктирными линиями указаны рамки допуска для погрешности измерения азимута ($\pm 1^\circ 30'$). Исследуемые источники: 1 (a, b); 2 (c, d); 3 (e, f)

Fig. 3. Differences ($\Delta\alpha$) between calculated and reference magnetic azimuth values on the calibration rig for different sighting inclination angles: without RMF influence (green squares), with RMF influence (red triangles), and with RMF influence compensated by the algorithm proposed here (blue circles). Inclination angles during measurements: 30° (a, c, e); 90° (b, d, f). Dotted lines show the azimuth error tolerance limits ($\pm 1^\circ 30'$). RMF source indices: 1 (a, b); 2 (c, d); 3 (e, f)

Обсуждение

Опыт обработки реальных каротажных данных показывает, что значение модуля магнитной индукции ПОН в месте расположения магнитометров, обычно, находится в диапазоне от 1 % до 6 % от величины ГМП [13, 17]. Кроме того, вектора ПОН не направлены строго по оси сборки [13]. Таким образом, выбранные источники (таблица) отражают свойства полей реальных источников.

Однако стоит отметить, что данные погрешности измерения азимута получены для г. Твери, где угол наклона ГМП равен $71^{\circ}25'48''$. Из-за меньшей горизонтальной составляющей вектора ГМП, в случае высоких широт значения погрешностей были бы больше [20] и могли доходить до $4-7^{\circ}$ даже в случае источника 2. В связи с этим рассматриваемую технологию можно считать особенно актуальной для использования на месторождениях, располагающихся на высоких широтах, включая перспективные месторождения Арктического шельфа.

Помимо корректировки магнитного азимута непосредственно во время бурения или каротажа, предложенный в работе метод компенсации влияния ПОН позволяет удешевить охранный кожух инклинометра вследствие уменьшения длины дорогостоящей немагнитной части, а также уменьшить длину немагнитных вставок по обе стороны от датчика при бурении.

Из минусов методики можно отметить удорожание инклинометрического датчика вследствие необходимости установки второго магнитометра. Тем не менее, в силу сравнительно небольшой стоимости магнитоме-

тров, удешевление корпуса и отсутствие необходимости дополнительной апостериорной обработки существенно снижают издержки. Также к минусам можно отнести усложнение алгоритмов калибровки вследствие необходимости согласования данных магнитометров. В то же время стоит отметить, что усложнение алгоритмов не усложняет работу оператора.

Заключение

Представленный в работе метод вычисления параметров поля остаточной намагниченности на основе измерений градиента суперпозиционного (суммы поля остаточной намагниченности и геомагнитного поля) магнитного поля, позволяет скорректировать погрешность измерения магнитного азимута в рамки допуска. Причем, для данной коррекции не требуются измеренные или эталонные значения параметров геомагнитного поля для места проведения каротажа. Кроме того, метод позволяет вычислять влияние не только осевой, но и радиальной составляющей, а также подстраиваться под изменения параметров поля остаточной намагниченности в случае перемагничивания или иных причин.

Таким образом, данный метод может быть использован при инклинометрии скважин непосредственно во время проведения работ. Для этого необходимо реализовать инклинометр-градиентометр в одном корпусе, а в процесс наладки внести процедуру согласования магнитометров. Данный датчик позволит сократить расходы на немагнитную часть корпуса, а также снизить требования по части наличия немагнитных вставок рядом с инклинометром.

Литература

1. Jamieson A. *Introduction to Wellbore Positioning*. University of the Highlands & Islands, 2012. 164 p.
2. Бармаков Ю.Н., Герасимчук О.А., Козырев П.В., Неуструев В.В., Филатов М.М., Юрков Д.И. Исследование и разработка методов для устранения намагниченности оборудования буровой установки // *Каротажник*. 2019. № 1 (295). С. 98–104.
3. Шафигуллин Р.И., Еромасов В.Г., Андрияков В.Ф., Никулин О.В. Устройство для размагничивания бурового инструмента. Патент RU № 2591056C1. Бюл. 2016. № 19.
4. Сидоров А.А., Харбаш В.Я., Шурыгин С.В. Способ определения и компенсации магнитной девиации инклинометра. Патент RU № 2186966C2. Бюл. 2002. № 16.
5. Рыжков И.В., Ковшов Г.Н. Расчет магнитной девиации инклинометра в условиях буровой // *Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры*. 2011. № 11-12 (164-165). С. 86–91.
6. Чупров В.П., Васильев А.В., Кудряшов А.А. Коррекция влияния намагниченности компоновки низа бурильной колонны на измерения азимута при навигации скважин с помощью телесистем // *Каротажник*. 2016. № 7 (265). С. 131–135.
7. Дмитриюков Ю.Ю., Исмагилов М.А. Способ измерения магнитного азимута в процессе бурения. Патент RU № 2349938C1. Бюл. 2009. № 8.
8. Горичка М.В., Кузнецов А.Б., Абзалов З.З., Бевзенко В.А. Замеры высокого разрешения // *Бурение и нефть*. 2018. № 9. С. 24–30.
9. Кейн С.А., Трохов В.В. Разработка технико-технологических рекомендаций по повышению качества выполнения проектной траектории наклонно-направленных скважин // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2015. № 1. С. 4–7.
10. Priest J., Quinn T., Frost E.Jr. Magnetic interference effects on accelerometer and magnetometer data: detection, quality control and

References

1. Jamieson A. *Introduction to Wellbore Positioning*. University of the Highlands & Islands, 2012, 164 p.
2. Barmakov Yu.N., Gerasimchuk O.A., Kozыrev P.V., Neustruev V.V., Filatov M.M., Yurkov D.I. Researches and working out methods to eliminate drilling-rig magnetization. *Karotazhnik*, 2019, no. 1 (295), pp. 98–104. (in Russian)
3. SHafigullin R.I., Eromasov V.G., Andiryakov V.F., Nikulin O.V. Device for demagnetisation of drilling tool. *Patent RU № 2591056C1*, 2016. (in Russian)
4. Sidorov A.A., Kharbash V.Ja., Shurygin S.V. Method of determination and compensation of inclinometer magnetic deviation. *Patent RU № 2186966C2*, 2002. (in Russian)
5. Ryzhkov I.V., Kovshov G.N. The calculation of the magnetic deviation of the inclinometer in the drilling. *Bulletin of the prdnipro state academy of construction and architecture*, 2011, no. 11-12 (164-165), pp. 86–91. (in Russian)
6. Chuprov V.P., Vasilev A.V., Kudryashov A.A. Correction for the effect of bottomhole assembly magnetization on azimuth measurements in borehole navigation by telesystems. *Karotazhnik*, 2016, no. 7 (265), pp. 131–135. (in Russian)
7. Dmitriyukov J.J., Ismagilov M.A. Method of magnetic azimuth measurement while drilling. *Patent RU № 2349938C1*, 2009. (in Russian)
8. Gorichka M.V., Kuznetsov A.B., Abzalov Z.Z., Bevzenko V.A. High definition surveys. *Burenie i nef't*, 2018, no. 9, pp. 24–30. (in Russian)
9. Keyn S.A., Trokhov V.V. Development of technical and technological recommendations on quality enhancement of project trajectory performance of directional wells. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*, 2015, no. 1, pp. 4–7. (in Russian)
10. Priest J., Quinn T., Frost E.Jr. Magnetic interference effects on accelerometer and magnetometer data: detection, quality control and

- correction // *Proc. of the 55th Annual Logging Symposium SPWLA*. 2014. P. 1–13.
11. Гринев И.В., Королев А.Б., Ситников В.Н. Контроль качества инклинометрических измерений. Учет суточных вариаций магнитного поля // *Каротажник*. 2015. № 12 (258). С. 99–108.
 12. Buchanan A., Finn C., Love J., Worthington W., Lawson F., Maus S., Okewunmi S., Poedjono B. Geomagnetic referencing - the real-time compass for directional drillers // *Oilfield Review*. 2013. V. 25. N 3. P. 32–47.
 13. Гринев И.В., Королев А.Б., Ситников В.Н., Гасанов О.В. Влияние радиальной составляющей поля остаточной намагниченности на показания инклинометра // *Каротажник*. 2025. № 1 (333). С. 147–153.
 14. Li Z., Geng Y., Yang Y., Wang W., Hang S. Estimation of geomagnetic components under unknown interferences for drilling tools // *Measurement Science and Technology*. 2024. V. 35. N 5. P. 056310. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad2b47>
 15. El Gizawy M., Lowdon R., Aklestad D.L. Combining magnetic and gyroscopic surveys provides the best possible accuracy // *SPE Drilling and Completion*. 2023. V. 38. N 4. P. 586–593. <https://doi.org/10.2118/212547-PA>
 16. Zhang Q., Pang H., Wan C. Magnetic interference compensation method for geomagnetic field vector measurement // *Measurement*. 2016. V. 91. P. 628–633. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.081>
 17. Гринев И.В., Королев А.Б., Ситников В.Н. Компенсация влияния поля остаточной намагниченности буровой колонны и сборки геофизических приборов на показания инклинометра // *Каротажник*. 2020. № 1 (301). С. 104–111.
 18. Биндер Я.И., Вольфсон Г.Б., Гаспаров П.М., Ключкин П.А., Розенцвейн В.Г. Компенсация магнитных помех в феррозондовом инклинометре // *Гироскопия и навигация*. 2005. № 1 (48). С. 68–75.
 19. Биндер Я.И., Ключкин П.А., Тихонов А.Г. Экспериментальное исследование магнитометрической системы ориентации ствола скважины с компенсацией магнитных помех // *Каротажник*. 2010. № 1 (190). С. 63–69.
 20. Гринев И.В., Королев А.Б., Ситников В.Н. Влияние остаточной намагниченности буровой колонны и сборки геофизических приборов на показания инклинометра // *Каротажник*. 2019. № 4 (298). С. 87–95.
 - correction. *Proc. of the 55th Annual Logging Symposium SPWLA*, 2014, pp. 1–13.
 11. Grinev I.V., Korolev A.B., Sitnikov V.N. Inclinometry measurements quality control. Corrections for daily variations in the magnetic field. *Karotazhnik*, 2015, no. 12 (258), pp. 99–108. (in Russian)
 12. Buchanan A., Finn C., Love J., Worthington W., Lawson F., Maus S., Okewunmi S., Poedjono B. Geomagnetic referencing - the real-time compass for directional drillers. *Oilfield Review*, 2013, vol. 25, no. 3, pp. 32–47.
 13. Grinev I.V., Korolev A.B., Sitnikov V.N., Gasanov O.V. The effect of the radial component of the remnant magnetization field on the inclinometer readings. *Karotazhnik*, 2025, no. 1 (333), pp. 147–153. (in Russian)
 14. Li Z., Geng Y., Yang Y., Wang W., Hang S. Estimation of geomagnetic components under unknown interferences for drilling tools. *Measurement Science and Technology*, 2024, vol. 35, no. 5, pp. 056310. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad2b47>
 15. El Gizawy M., Lowdon R., Aklestad D.L. Combining magnetic and gyroscopic surveys provides the best possible accuracy. *SPE Drilling and Completion*, 2023, vol. 38, no. 4, pp. 586–593. <https://doi.org/10.2118/212547-PA>
 16. Zhang Q., Pang H., Wan C. Magnetic interference compensation method for geomagnetic field vector measurement. *Measurement*, 2016, vol. 91, pp. 628–633. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.081>
 17. Grinev I.V., Korolev A.B., Sitnikov V.N. Compensation of the effect of the field of remanent magnetization of the drillstem and well logging tools string on the inclinometer readings. *Karotazhnik*, 2020, no. 1 (301), pp. 104–111. (in Russian)
 18. Binder Ya.I., Volfson G.B., Gasparov P.M., Klushkin P.A., Rozentsvein V.G. Magnetic disturbances compensation in flux-gate inclinometer. *Gyroscope and Navigation*, 2005, no. 1 (48), pp. 68–75. (in Russian)
 19. Binder Ya.I., Klyushkin P.A., Tikhonov A.G.. Experimental investigation on a magnetometric system for borehole orientation with magnetic noise compensation. *Karotazhnik*, 2010, no. 1 (190), pp. 63–69. (in Russian)
 20. Grinev I.V., Korolev A.B., Sitnikov V.N. The effect of the remanent magnetization of the drillstem and logtool set on the inclinometer readings. *Karotazhnik*, 2019, no. 4 (298), pp. 87–95. (in Russian)

Авторы

Гасанов Олег Валерьевич — заведующий отделом, ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, 170033, Российская Федерация, [sc 56548899800](https://orcid.org/0009-0004-6275-688X), <https://orcid.org/0009-0004-6275-688X>, gasanov.o@karotazh.ru

Ситников Виталий Николаевич — инженер, ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, 170033, Российская Федерация, [sc 57190258699](https://orcid.org/0009-0009-0226-3297), <https://orcid.org/0009-0009-0226-3297>, v.sitnikov@karotazh.ru

Хаматдинов Вадим Рафисович — кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, 170033, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0006-3257-0317>, hvadim@karotazh.ru

Гринев Илья Викторович — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, 170033, Российская Федерация, [sc 37661261600](https://orcid.org/0009-0003-9078-4792), <https://orcid.org/0009-0003-9078-4792>, i.grinev@karotazh.ru

Королев Александр Борисович — эксперт-консультант, ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, 170033, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-1290-574X>, korolev@karotazh.ru

Статья поступила в редакцию 19.02.2025

Одобрена после рецензирования 02.09.2025

Принята к печати 22.11.2025

Authors

Oleg V. Gasanov — Head of Department, LTD Neftegazgeofizika, Tver, 170033, Russian Federation, [sc 56548899800](https://orcid.org/0009-0004-6275-688X), <https://orcid.org/0009-0004-6275-688X>, gasanov.o@karotazh.ru

Vitaly N. Sitnikov — Engineer, LTD Neftegazgeofizika, Tver, 170033, Russian Federation, [sc 57190258699](https://orcid.org/0009-0009-0226-3297), <https://orcid.org/0009-0009-0226-3297>, v.sitnikov@karotazh.ru

Vadim R. Khamatdinov — PhD, General Manager, LTD Neftegazgeofizika, Tver, 170033, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-3257-0317>, hvadim@karotazh.ru

Ilya V. Grinev — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, LTD Neftegazgeofizika, Tver, 170033, Russian Federation, [sc 37661261600](https://orcid.org/0009-0003-9078-4792), <https://orcid.org/0009-0003-9078-4792>, i.grinev@karotazh.ru

Alexander B. Korolyov — Expert Advisor, LTD Neftegazgeofizika, Tver, 170033, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-1290-574X>, korolev@karotazh.ru

Received 19.02.2025

Approved after reviewing 02.09.2025

Accepted 22.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»