

Научная статья

УДК 550.832.9

DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-3-40-48

Программно-аппаратные решения потоковой обработки данных для компенсации температурных дрейфов скважинного инклинометра «Луч»

Василий Сергеевич Литвинов¹
Александр Александрович Власов^{1,2,3}
Дмитрий Владимирович Тейтельбаум¹

¹Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч»

²Новосибирский государственный университет

³Институт автоматизации и электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия

litvinov@looch.ru
a.vlasov@nsu.ru
teytelbaum@looch.ru

Аннотация

Новосибирское научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч» разрабатывает и производит телеметрические системы, эксплуатируемые в процессе бурения нефтегазовых скважин. В их состав входит датчик ориентации (инклинометр), оценивающий положение прибора в скважине на основе сигналов с трех акселерометров и трех магнитометров. Модули системы работают в условиях повышенных температур (до 150 °С), и для обеспечения заданной погрешности измерений углов ориентации требуется компенсация температурных дрейфов. В данной работе приводятся оценки допустимых дрейфов показаний датчиков, температурная полиномиальная модель акселерометров и магнитометров, методика компенсации. Проведен эксперимент, по результатам которого определена пригодность используемой модели и методики.

Ключевые слова

инклинометр, компенсация, температурный дрейф, калибровка

Для цитирования

Литвинов В. С., Власов А. А., Тейтельбаум Д. В. Программно-аппаратные решения потоковой обработки данных для компенсации температурных дрейфов скважинного инклинометра «Луч» // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 3. С. 40–48. DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-3-40-48

© Литвинов В. С., Власов А. А., Тейтельбаум Д. В., 2024

Software and Hardware Solution for Stream Processing of Data for Compensation of Temperature Drifts of LWD Orientation Sensor «Looch»

Vasily S. Litvinov¹, Alexander A. Vlasov^{1,2,3},
Dmitry V. Teytelbaum¹

¹ Scientific-production enterprise of geophysical equipment “Looch”

² Novosibirsk State University

³ Institute of Automation and Electrometry SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

litvinov@looch.ru

a.vlasov@nsu.ru

teytelbaum@looch.ru

Abstract

The Scientific-production enterprise of geophysical equipment “Looch” develops and manufactures LWD telemetry systems used in the process of drilling oil and gas wells. They include an orientation sensor (inclinometer) that estimates the position of the device in the well based on signals from three accelerometers and three magnetometers. System modules operate at high temperatures (up to 120 °C), and temperature drift compensation is required to ensure the specified orientation measurement error. This paper provides estimates of allowable drifts of sensor readings, a temperature polynomial model of accelerometers and magnetometers, and a compensation technique. An experiment was carried out, the results of which determined the suitability of the model and methodology used.

Keywords

LWD orientation sensor, temperature drift, compensation, calibration

For citation

Litvinov V. S., Vlasov A. A., Teytelbaum D. V. Software and hardware solution for stream processing of data for compensation of temperature drifts of LWD orientation sensor «Looch». *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2024, vol. 22, no. 3, pp. 40–48 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-3-40-48

Введение

В современном мире нефтегазовая промышленность имеет огромное значение для экономики и жизни людей. Развитие этой отрасли требует постоянного совершенствования технологий и методов добычи полезных ископаемых. Во время бурения скважин важное место занимает контроль их траектории для проведения по продуктивной части пласта-коллектора. В настоящее время развито применение телеметрических систем, проводящих измерения внизу колонны непосредственно в процессе бурения и передающих актуальные значения параметров на поверхность.

Инклинометрия является прямым способом контроля за траекторией проводящейся скважины и позволяет определить три угла ориентации бурового инструмента [1]. Зенитный угол определяет наклон относительно линии отвеса, азимут определяет направление в горизонтальной плоскости, угол установки отклонителя определяет поворот прибора вокруг собственной оси и используется для задания направления бурения, в котором происходит искривление траектории ствола скважины.

Новосибирское научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч» производит собственные телеметрические системы, в состав которых входит узел инклинометра. В процессе бурения скважин измерительное оборудование может нагреваться до 150 °C, поэтому важно контролировать работоспособность приборов и качество измерений во всем диапазоне температур.

Например, для акселерометра JAE в документации приведены следующие верхние границы для дрейфов:

- масштабный коэффициент: $\pm 300 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ при температурах от 100°C ;
- смещение нуля: $\pm 100 \text{ мк g}/^\circ\text{C}$.

При использовании таких датчиков при повышении температуры с комнатных 20°C до 150°C возможен дрейф с $1,00 \text{ g}$ до $1,04 \text{ g}$ в вертикальном положении датчика и с $0,00 \text{ g}$ до $0,01 \text{ g}$ в горизонтальном положении датчика. Такие отклонения критично сказываются на качестве измерений, поэтому требуют устранения.

В данной работе решается задача программной компенсации температурных дрейфов сигналов для инклинометра «Луч» с целью улучшения его потребительских качеств.

Для достижения результата нужно было пройти ряд этапов: изучение характеристик датчиков, разработка методики температурной калибровки, разработка программы для микроконтроллера; разработка ПО для осуществления температурной калибровки при производстве инклинометров.

Общие сведения об инклинометре «Луч»

В состав инклинометра НПП ГА «Луч» (рис. 1) входят три одноосевых датчика ускорения маятникового типа и один трехосевой феррозондовый магнитометр, размещенные в разных концах прибора.



Рис. 1. Инклинометр производства НПП ГА «Луч» и система координат прибора
Fig. 1. Inclinometer produced by NPP GA Luch and the coordinate system of the device

Это сделано для исключения влияния магнитного поля, создаваемого током через катушки акселерометров, на показания магнитометра. На шасси установлено два термодатчика, измеряющих температуру в удаленных друг от друга точках прибора. Также в состав прибора входят платы источников питания, аналого-цифрового преобразования. Обработка сигналов производится на микроконтроллере STM32L496. Интерфейс асинхронный, протокол взаимодействия проприетарный, унифицированный для всех компонент телеметрической системы.

Пользователи подключаются к прибору при помощи ПО Colibri5 [5], позволяющим производить опрос датчиков, калибровку, сервисное обслуживание.

Система координат прибора привязана к его корпусу (рис. 1). Ось OZ направлена продольно от «верхней» части корпуса (направленной от забоя) к «нижней» (направленной в сторону забоя). Ось OY направлена поперечно, от оси прибора в сторону метки на корпусе. Ось OX направлена таким образом, что OX, OY, OZ формируют правый ортонормированный базис.

Направления физических осей чувствительности акселерометров и магнитометров грубо сориентированы в соответствии с направлениями осей прибора. Обозначения $\underline{ig} = \{ig_x, ig_y, ig_z\}$, $\underline{ib} = \{ib_x, ib_y, ib_z\}$ соответствуют сигналу датчиков, полученному контроллером с АЦП, измеряются в условных единицах ускорения и магнитной индукции.

Сигнал \underline{ig} , \underline{ib} подвержен воздействию температурного дрейфа, для которого в программе микроконтроллера производится компенсация, в результате которой получаются сигналы \underline{tg} , $\underline{tb} = thermoCal(\underline{ig}, \underline{ib}, T, pThermo)$, где T – температура прибора, $pThermo$ – параметры температурной калибровки, уникальные для каждого прибора.

Имеет место разброс масштабов, смещений нуля сигнала, обусловленных электроникой, а также обусловленная механически неортогональность осей чувствительности. В микроконтроллере также производится компенсация этих параметров, в результате чего получаются сигналы $\bar{g}, \bar{b} = \text{GeomCal}(tg, tb, pGeom)$, где $pGeom$ – параметры геометрической калибровки, уникальные для каждого прибора.

Калибровочные параметры $pThermo, pGeom$ вычисляются в процессе настройки прибора при его производстве или ремонте, и записываются при помощи ПО Colibri5 в ПЗУ микроконтроллера.

Углы ориентации вычисляются из сигналов \bar{g}, \bar{b} следующим образом:

$$Zeni = \arctan2(\sqrt{g_x^2 + g_y^2}, g_z)$$

$$AzNumer = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} * (g_x b_y - g_y b_x)$$

$$AzDenom = b_z * (g_x^2 + g_y^2) - g_z * (g_x b_x + g_y b_y)$$

$$Azim = (\arctan2(AzNumer, AzDenom) + 360^\circ) \bmod 360^\circ$$

$$TFG = (\arctan2(-g_x, g_y) + 360^\circ) \bmod 360^\circ$$

$$TFM = (\arctan2(-b_x, b_y) + 360^\circ) \bmod 360^\circ$$

$$TF = \begin{cases} TFG, & \text{если } Zeni \geq 4^\circ \\ TFM, & \text{если } Zeni < 4^\circ \end{cases}$$

где $Zeni$ – зенитный угол, $Azim$ – азимут, TF – угол установки отклонителя.

Требуемые погрешности измерения для инклинометра «Луч» аналогичны паспортным погрешностям эксплуатируемого аналога – инклинометра APS760 [2] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики инклинометра APS760

Table 1

APS760 Inclinometer Specifications

Параметр	Значение
Погрешность измерения зенитного угла	$\pm 0,1^\circ$
Погрешность измерения азимута (при зените 90°)	$\pm 0,3^\circ$
Погрешность измерения азимута (при зените 10°)	$\pm 1^\circ$
Погрешность измерения азимута (при зените 5°)	$\pm 2^\circ$
Погрешность измерения угла установки отклонителя	$\pm 0,5^\circ$
Диапазон рабочих температур	$0 \dots 150^\circ \text{C}$

Процесс калибровки устраняет значительную часть систематической погрешности, но из-за несовершенства данных и моделей, используемых для калибровки, часть погрешности остается не исключенной, то есть сигналы \bar{g}, \bar{b} содержат в себе отклонение от идеальных проекций. Для соответствия инклинометра заявленным требованиям были определены допустимые

значения такого отклонения. Расчет был произведен программно, для местности с магнитной индукцией 59,08 мкТл и магнитным наклоном 74,79°. При варьировании сигналов \bar{g}, \bar{b} в заданных пределах была определена зависимость вариации углов ориентации от зенита (при всех возможных азимутах и углах установки отклонителя). Результаты расчета представлены на рис. 2. По этим результатам допустимо, например, отклонение в пределах $\pm 0,001$ g по всем трем акселерометрам и $\pm 0,20$ мкТл по всем трем магнитометрам.

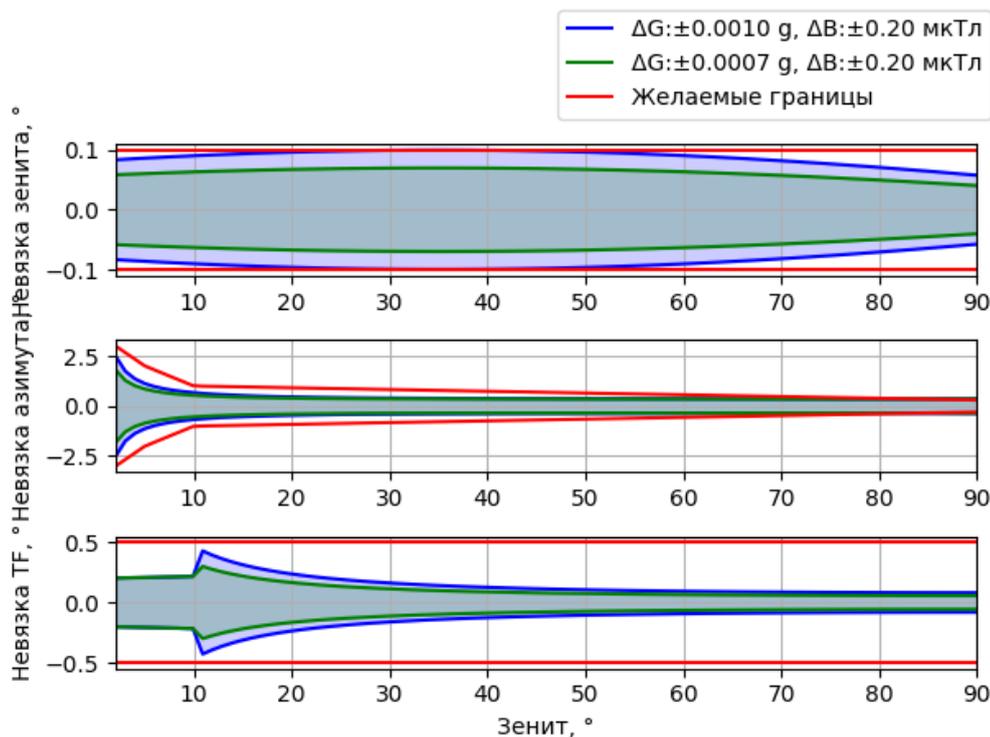


Рис. 2. Вариация углов ориентации при разных вариациях сигналов \bar{g}, \bar{b}
 Fig. 2. Variation of orientation angles for different variations of signals \bar{g}, \bar{b}

К скважинным инклинометрам, применяемым в процессе бурения, предъявляется требование возможности работы в широком диапазоне температур от 0 °С до 120 °С. Изменение рабочей температуры инклинометра ведет к возникновению дрейфа в измерительной части, заметно превышающего допустимые отклонения. Например, при нагреве экспериментального прибора от 25 °С до 140 °С в неизменном положении показания акселерометров изменялись на величины до 0,0155 g, что превышает допустимое отклонение в $\pm 0,001$ g, поэтому требует компенсации.

Было принято решение использовать программный метод компенсации дрейфов как наиболее гибкий.

В используемую температурную модель в соответствии с паспортом акселерометров и магнитометров были включены масштабный коэффициент и смещение нуля, зависящие от температуры:

$$m(T) = k(T) * m(T_k) + b(T),$$

где T – температура окружающей среды, °С, $m(T)$ – сигнал датчика при данной температуре, g или мкТл, T_k – комнатная температура, °С, $k(T)$ – масштаб, $b(T)$ – смещение нуля, g или мкТл.

Для определения масштаба и смещения нуля проводился следующий эксперимент. Прибор нагревался закрепленным в наклонной печи (рис. 3), установленной под углом 45° к горизонту, и выполненной из немагнитных материалов, до температуры 150°C . Затем показания датчиков фиксировались в процессе плавного остывания в течение 12 часов до комнатной температуры. Сигналы регистрировались в течение нескольких циклов нагрева-остывания, на каждой итерации изменялось положение прибора для охвата максимально широкого диапазона значений датчиков (акселерометров и магнитометров).



Рис. 3. Наклонная печь для проведения термоиспытаний, изготовлена из немагнитных материалов

Fig. 3. Inclined furnace for thermal testing, made of non-magnetic materials

Затем вычислялись $k(T)$ и $b(T)$ для каждой из температур в диапазоне $30\text{...}150^\circ\text{C}$ с шагом в 2°C . Для определенности системы брались пары записей, соответствующих разным положениям прибора.

По результатам экспериментальных циклов нагрева-остывания (рис. 4, 5) функции $k(T)$, $b(T)$ для акселерометров и магнитометров были аппроксимированы многочленами третьей степени. Коэффициенты многочленов записываются в ПЗУ микроконтроллера, и формируют структуру *pThermo*. В процессе работы микропрограммы определяются актуальные значения $k(T)$, $b(T)$ для каждого из 6 датчиков в зависимости от сигнала с термодатчика, размещенного рядом с акселерометрами или магнитометрами, и смоделированный дрейф вычитается из сигнала, поступающего с АЦП.

Также была сформирована методика проведения термокалибровки инклинометра:

1. Запись сигналов датчиков в процессе остывания в двух положениях, широко охватывающих диапазон сигналов датчиков при физических ограничениях печи:
 - а) зенит = 45° , азимут = 45° , поворот вокруг оси = 45° ;
 - б) зенит = 135° , азимут = 135° , поворот вокруг оси = 225° .
2. Подбор калибровочных параметров на основании данных двух записей; запись полученных настроек в память инклинометра в структуру *pThermo*.
3. Дополнительный цикл нагрева-остывания в третьем положении, для экспериментального подтверждения успешного подбора.

Результаты

По результатам экспериментов температурный дрейф масштабного коэффициента для акселерометров удалось снизить с $1 \pm 0,1$ до $\pm 0,1$ %, дрейф смещения нуля с $0,0012 \pm 0,0002$ до $\pm 0,0002$ g на диапазоне температур 20...150 °C (рис. 4).

Дрейф масштабного коэффициента магнитометров удалось снизить с $1,5 \pm 0,3$ до $\pm 0,3$ %, дрейф смещения нуля с $0,1 \pm 0,09$ до $\pm 0,09$ мкТл (рис. 5).

Применение компенсации для каждого из датчиков позволяет снизить дрейф зенита до $\pm 0,12^\circ$; азимута до $\pm 0,4^\circ$ (при зените 90°); угла установки отклонителя до $\pm 0,5^\circ$; расчетного модуля ускорения до $\pm 0,0013$ g; расчетного модуля магнитной индукции с до $\pm 0,32$ мкТл.

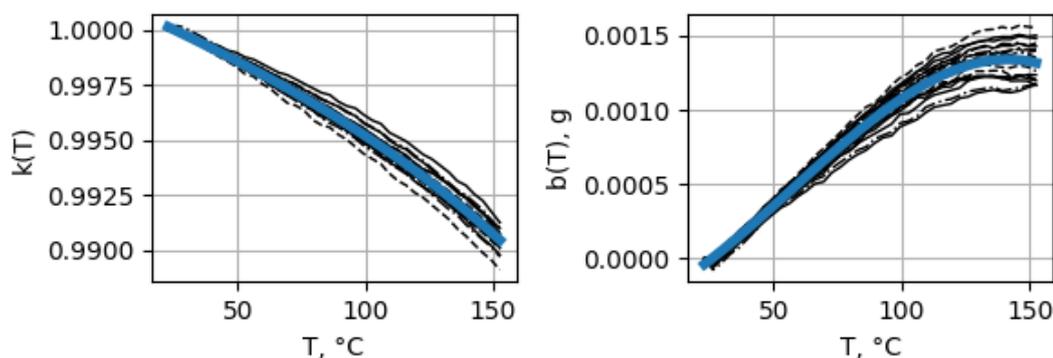


Рис. 4. Характеристики $k(T)$, $b(T)$ для одного из трех акселерометров
Fig. 4. Characteristics for one of the three accelerometers

Черными графиками показаны варианты, рассчитанные на основе разных пар записей, со значениями проекций ускорения (g) $-0,66$; $-0,5$; $-0,27$; $0,02$; $0,49$; $0,26$; $0,7$. Синий график – результат аппроксимации.

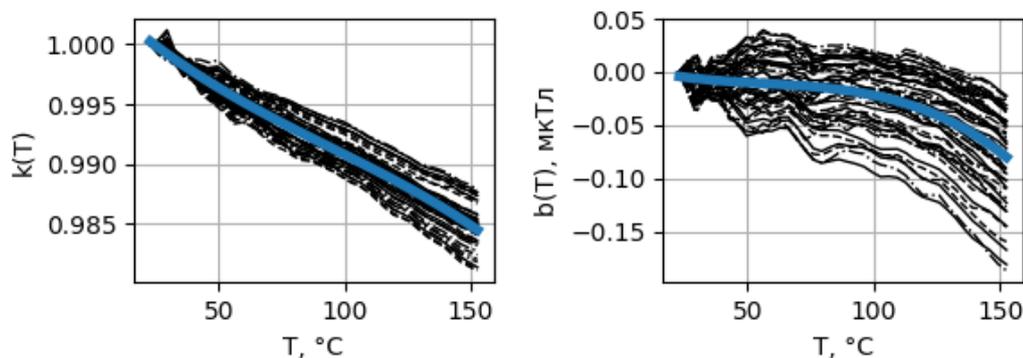


Рис. 5. Характеристики $k(T)$, $b(T)$ для одного из трех магнитометров
Fig. 5. Characteristics for one of the three magnetometers

Значения проекции магнитной индукции, для которых проводился расчет (мкТл): -40 , -23 , -7 , 21 , 35 , 40 . Синий график – результат аппроксимации.

В табл. 2 приведен расчет полученной суммарной погрешности в двух температурных диапазонах: $20 \dots 120$ °С и $20 \dots 150$ °С.

Таблица 2

Полученные погрешности

Table 2

Obtained errors			
Параметры	Температурная	Геометрическая	Суммарная
Зенит, $20 \dots 120$ °С	$\pm 0,085^\circ$	$\pm 0,01^\circ$	$\pm 0,095^\circ$
Азимут при зените 90° , $20 \dots 120$ °С	$\pm 0,3^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,4^\circ$
Отклонитель при зените 90° , $20 \dots 120$ °С	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
Зенит, $20 \dots 150$ °С	$\pm 0,12^\circ$	$\pm 0,01^\circ$	$\pm 0,13^\circ$
Азимут при зените 90° , $20 \dots 150$ °С	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
Отклонитель при зените 90° , $20 \dots 150$ °С	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,6^\circ$

Обсуждение

Приведенные в табл. 2 суммарные погрешности в диапазоне температур $20 \dots 120$ °С превышают заявленные в спецификации APS-760 погрешности по азимутальному углу. Этот факт, возможно, обусловлен разными условиями калибровки. Горизонтальная составляющая магнитного поля в Новосибирске (место калибровки инклинометра «Луч») составляет $15,7$ мкТл от общего поля $60,3$ мкТл, в Сан-Франциско (место калибровки APS-760) составляет $22,9$ мкТл от общего поля $47,5$ мкТл. Погрешность определения азимутального угла напрямую зависит от модуля горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Остальные суммарные погрешности не превышают аналогичные у APS760.

Вне зависимости от температурного диапазона полученные погрешности соответствуют руководящему документу: «Допускаемая основная погрешность измерения азимута для зенитных углов более 3° не более $\pm 2^\circ$, допускаемая основная погрешность измерения зенитного угла – не более $\pm 0,5^\circ$ » [6]. Корпоративные стандарты заказчиков предъявляют более строгие требования к характеристикам прибора, чем руководящий документ: допускаемая основная погрешность измерения азимута для зенитных углов более 3° , не более $\pm 1,5^\circ$, допускаемая основная погрешность измерения зенитного угла – не более $\pm 0,25^\circ$. Полученные погрешности соответствуют и этим стандартам.

Заключение

Разработано программное обеспечение, методика калибровки инклинометра производства ООО НПП ГА «Луч», проведены лабораторные испытания с положительным результатом. Благодаря переходу на ПО и платы собственного производства ожидается повышение ремонтно-пригодности и снижение трудозатрат на модернизацию оборудования.

Список литературы

1. Ковшов Г. Н., Коловертнов Г. Ю. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. 228 с.

2. Model 760 Directional Sensor // Applied Physics Systems. URL: https://appliedphysics.com/wp-content/uploads/2022/06/APS_DataSheet_Model760_vA.pdf (дата обращения: 17.01.2024).
3. Семейство универсальных гироскопических инклинометров УГИ-42 // АО «СКБ ПН». URL: <http://skbnp.ru/ugi-42> (дата обращения: 17.04.2024).
4. Каротажный кабельный магнитометрический инклинометр «Кварц-36.04К» // АО «СКБ ПН». URL: <http://skbnp.ru/quartz-36.04> (дата обращения: 17.04.2024).
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664639. Colibri5 / А. А. Власов, Д. В. Тейтельбаум, А. М. Найденов – Заявка №2018618675. Дата поступления 14 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 ноября 2018 г.
6. РД 153-39.0-072-01 «Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах» (введен в действие приказом Министерства энергетики РФ от 7 мая 2001 г. N 134)

Referenses

1. **Kovshov G. N., Kolovertnov G. Yu.** Instruments for monitoring the spatial orientation of wells during drilling. Ufa, Publishing house of Ufa State Petroleum Technical University, 2001, 228 p.
2. Model 760 Directional Sensor. *Applied Physics Systems*. URL: https://appliedphysics.com/wp-content/uploads/2022/06/APS_DataSheet_Model760_vA.pdf (date of access: 17.01.2024).
3. Family of universal gyroscopic inclinometers UGI-42. *JSC "SKB PN"*. URL: <http://skbnp.ru/ugi-42> (date of access: 17.04.2024).
4. Logging cable magnetometric inclinometer "Quartz-36.04K". *JSC "SKB PN"*. URL: <http://skbnp.ru/quartz-36.04> (date of access: 17.04.2024).
5. Certificate of state registration of computer program No. 2018664639. Colibri5 / A. A. Vlasov, D. V. Teitelbaum, A. M. Naidenov – Application No. 2018618675. Date of receipt: August 14, 2018. Registered in the Register of Computer Programs: November 20, 2018
6. RD 153-39.0-072-01 "Technical instructions for conducting geophysical surveys and work with cable instruments in oil and gas wells" (put into effect by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated May 7, 2001. N 134).

Сведения об авторах

Литвинов Василий Сергеевич, инженер-программист

Власов Александр Александрович, кандидат технических наук, ведущий геофизик
Research ID: J-3644-2018

Тейтельбаум Дмитрий Владимирович, начальник отдела программного обеспечения

Information about the Authors

Vasily S. Litvinov, Software Engineer

Alexander A. Vlasov, Ph.D., Leading Geophysicist, Engineer
Research ID: J-3644-2018

Dmitry V. Teitelbaum, Head of Software Department

*Статья поступила в редакцию 15.10.2024;
одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 28.10.2024*

*The article was submitted 15.10.2024;
approved after reviewing 28.10.2024; accepted for publication 28.10.2024*