

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИНКЛИНОМЕТРОВ

А. В. ВОРОБЬЕВ, Г. Р. ШАКИРОВА, Г. А. ИВАНОВА

gimslab@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 12 января 2015 г.

Аннотация. Исследуются и анализируются естественные факторы, воздействующие на показания инклинометрических систем. Дается краткий обзор известных классов инклинометрических систем, приводятся их основные характеристики. Обсуждается принцип работы магнитометрических инклинометров. С учетом возможностей и принципов работы магнитометрических инклинометров предлагается и формализуется механизм их применения в геологии.

Ключевые слова: геомагнитное поле; геомагнитные вариации; инклинометрическая система.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время специалисты в области геофизики, геологии, технических наук и многих других сфер научных знаний уделяют все большее внимание сопоставлению параметров внешних геомагнитных вариаций (ГМВ) с тенденциями существования и развития под их влиянием объектов и систем различной природы происхождения, анализу полученных результатов и выявлению соответствующих закономерностей.

Согласно известным статистическим данным, некоторые составляющие ГМВ или их определенное сочетание могут непосредственно или косвенно воздействовать как на биологические, технические, геологические и прочие объекты и системы в целом, так и на человека в частности. Искаженные условия существования системы вынуждают ее либо приспосабливаться к изменениям окружающей магнитной обстановки, либо продолжать существовать в ней в стрессовом (неустойчивом или аварийном) режиме [1].

Так, к примеру, в условиях активно развивающегося наклонно-направленного и горизонтального бурения одним из перспективных направлений современной нефтегазодобывающей

промышленности является контроль пространственного положения ствола скважины. При этом значимым показателем качества контроля пространственного положения ствола скважины является анализ и минимизация ГМВ локального, регионального или глобального характера любой природы происхождения.

1. АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Задача подземной навигации и ориентации решается при помощи инклинометрического измерительного комплекса, состоящего из скважинного модуля и наземного устройства, обмен информацией между которыми осуществляется по каналу связи [2].

К основным задачам, которые позволяют решать современные инклинометрические системы, относятся:

- контроль заданного направления;
- получение данных для построения профиля скважины;
- выявление искривлений и перегибов;
- достижение проектной точки бурения, соблюдение нормативно-правовых требований.

Классификация инклинометрических систем представляет собой многоуровневую систему [2, 3]. Так, по принципу возможности совмещения с процессом бурения инклинометрические

системы делят на забойные и промерочные. Забойные инклинометрические системы используют для управления ориентацией бурового инструмента и контроля траектории скважины в процессе бурения. Промерочные инклинометрические системы используют для повторной съемки скважины с целью подтверждения заявленной точности позиционирования.

По наличию канала связи инклинометрические системы делятся на автономные (без канала связи) и с каналом связи «устье-забой». Преимущество инклинометрических систем с каналом связи заключается в возможности передачи информации на поверхность. В автономных инклинометрических системах получение информации возможно только после подъема инклинометра из скважины. По виду канала связи инклинометрические системы делятся на электромагнитные, проводные, акустические, гидравлические и др. [2, 3].

Дальнейшая классификация инклинометрических систем происходит по типу используемых первичных датчиков (магнитометрические или гироскопические), по режимам работы (точечные или непрерывные) и т. д.

К современным инклинометрическим системам предъявляется ряд метрологических, конструктивных и эксплуатационных требований [2, 4]. Основные параметры скважинной аппаратуры должны соответствовать следующим значениям:

- диапазон измерения азимута – от 0 до 360°;
- границы диапазонов измерения зенитного угла – от 0 до 45, 90, 135, 180°;
- допустимая основная погрешность измерения азимута (при зенитных углах более 3°) – не более $\pm 2^\circ$;
- допустимая основная погрешность измерения зенитного угла – не более $\pm 0,5^\circ$;
- дополнительная погрешность, вызванная изменением напряжения питания, – не более 0,2 значения основной погрешности;
- дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры, – не более 0,1 значения основной погрешности на каждые 10° С.

Наружный диаметр кожуха современных скважинных приборов принимает следующие значения: 25, 30, 36, 42, 48, 60, 73, 90, 100 мм. На сегодняшний день согласно стандартам Российской Федерации универсальным можно считать скважинный прибор с диаметром 42 мм [4]. Инклинометрические системы должны функционировать в тяжелых эксплуатационных условиях: высокие температуры до 200° С и дав-

ление до 150 МПа. В бурящихся скважинах по мере углубления температура повышается, в то же время в процессе бурения непрерывно циркулирует жидкость, которая оказывает влияние на тепловой режим скважины [4]. На практике для большинства скважин эти параметры не превосходят значения 100–120° С и 60 МПа.

На работоспособность инклинометрических систем также оказывают влияние вибрации и удары. Согласно требованиям, инклинометрическая система должна сохранять свои рабочие параметры в течение шести часов при воздействии вибраций частотой до 70 Гц и ускорением до 50 g, и в течение 0,5 часа при воздействии ударов с ускорением до 100 g и частотой ударов до 30 ударов в минуту [4].

На сегодняшний день при выборе инклинометрических систем предпочтение, как правило, отдается *магнитометрическим инклинометрам*, обладающим достаточной точностью, приемлемой ценой и возможностью совмещения с процессом бурения. Наиболее широкое распространение в нашей стране и за рубежом получили магнитометрические инклинометры с неподвижно закрепленными на шасси тремя магнитометрами и тремя акселерометрами [5].

Следует отметить, что погрешность чувствительных датчиков магнитометрических инклинометров зависит от наличия намагниченных масс, что, в свою очередь, накладывает ограничения на область применения магнитометрических измерительных систем [2, 5, 6]. Таким образом, все существующие магнитометрические инклинометры применяют для проведения измерений только в открытых скважинах. Магнитометрические инклинометры неработоспособны при зарезке боковых стволов из обсаженных скважин, при кустовом бурении и восстановлении старых месторождений. Следует также отметить невозможность применения магнитометрических инклинометров при разработке шельфовых месторождений нефти и газа по причине малой горизонтальной составляющей геомагнитного поля (ГМП) на высоких широтах (74–78°) [4, 5]. Особое значение при использовании магнитометрических инклинометров имеет учет геомагнитных вариаций различной природы происхождения.

2. АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

Геомагнитные вариации – это отклонения реально наблюдаемых преимущественно амплитудных параметров магнитосферы Земли от расчетных значений, принимаемых за нормаль-

ное (невозмущенное) состояние геомагнитосферы.

Основываясь на данном определении, рассмотрим события, явления и процессы (естественной природы происхождения), сопровождаемые, как правило, ГМВ.

- Вращение Земли вокруг собственной оси обуславливает «суточные вариации геомагнитного поля» в точке земной поверхности, связанные с изменением положения этой точки относительно стационарной солнечно-магнитосферной системы координат, ось OX которой направлена с Земли на Солнце; ось OY располагается в плоскости эклиптики и направлена с утра на вечер; ось OZ направлена на полюс эклиптики [7, 8].

- Вращение Луны вокруг Земли наводит слабые и практически незначительные периодические вариации ГМП, связанные с положением Луны относительно системы Земля-Солнце.

Объясняется данный феномен тем, что траектория движения естественного спутника Земли по своей орбите регулярно пересекается с траекторией движения солнечного ветра, вследствие чего вблизи земной поверхности наблюдаются вариации параметров геомагнитосферы, коррелирующие с лунным циклом.

Кроме того, хотя Луна и не имеет собственной ярко выраженной магнитосферы, на ее поверхности зарегистрированы локальные магнитные аномалии, существование которых обусловлено наличием в составе ее грунта ферримагнитного ильменита (титанистый железняк $FeTiO_3$), обладающего свойствами постоянного магнита при концентрации оксида железа Fe_2O_3 более 25 %.

- Вращение Солнца вокруг собственной оси обеспечивает «27-дневные геомагнитные вариации», что соответствует полному обороту Солнца вокруг собственной оси. Природа этих вариаций заключается в том, что наиболее активные области Солнца выбрасывают солнечную плазму в окружающее пространство не радиально, а направленно. Таким образом, при условии сохранения этими областями своей активности в течение нескольких солнечных оборотов, наблюдается ~27-дневная периодичность ГМВ.

- Вращение Земли вокруг Солнца объясняет так называемые «сезонные вариации геомагнитного поля», связанные с взаимным расположением плоскостей земного и солнечного экваторов. В случае совпадения этих плоскостей (осеннее и весеннее равноденствие) наблюдаются максимумы сезонных вариаций, в против-

ном случае (летнее и зимнее солнцестояние) регистрируют минимумы сезонных вариаций ГМП. Причиной такой закономерности служит повышенная концентрация активных областей на Солнце, сгруппированных в зонах от 10° до 30° северной и южной гелиографических широт.

- 11-летние вариации геомагнитного поля, связаны по своей природе с вариацией значения числа Вольфа – числового показателя количества пятен на Солнце, вычисляемого согласно выражению (1):

$$W = k(f + 10g), \quad (1)$$

где f – количество наблюдаемых пятен; g – количество наблюдаемых групп пятен; k – нормированный коэффициент.

Конфигурация магнитного солнечных пятен достаточно сложная, однако в правильных пятнах изменение напряженности поля можно аппроксимировать выражением [8]:

$$H = H_0 \left(1 + \left(\frac{r}{R_S} \right)^2 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где H_0 – напряженность магнитного поля в центре тени; R_S – радиус пятна, r – расстояние от центра до пятна.

В результате последних исследований было установлено, что период данного цикла составляет не 11 лет, а 22 года (два 11-летних цикла с противоположной полярностью вектора магнитной индукции).

Однако отметим, что 11 лет является усредненным значением периода ГМВ, так как известны процессы аналогичной природы, период которых составлял от 8 до 14 лет.

- Движение вещества и волновые процессы в жидком проводящем ядре Земли провоцируют так называемые «вековые вариации геомагнитного поля». Реальный период ГМВ данной природы происхождения во многих наблюдаемых случаях далек от 100 лет и обычно укладывается в диапазон 10–20 лет.

Наблюдение и анализ именно вековых вариаций ГМП помимо того, что повышает объективность представления о вариациях магнитосферы Земли в целом, на сегодняшний день является одним из основных инструментов, используемых при изучении процессов, протекающих в ядре планеты.

- Солнечный ветер – поток ионизированных частиц, преимущественно гелиево-водородной плазмы, радиально истекающий из солнечной короны со скоростью 300–1200 км/с в окружающее космическое пространство. Данное

природное явление обуславливает возникновение магнитных бурь – сильных возмущений магнитного поля Земли, резко искажающих его параметры относительно медленных периодических вариаций. Средняя продолжительность таких бурь обычно составляет десятки часов.

- Экзокосмическая магнитная активность – комплекс геомагнитных возмущений, вызванных повышенной магнитной активностью небесных тел (кроме Солнца), как входящих в Солнечную систему (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, кометы и пр.), так и находящихся за ее пределами. Так, к примеру, магнитосфера Юпитера по силовым характеристикам в $2 \cdot 10^4$ превосходит земную, что, естественно, не может не находить отражения в параметрах и вариациях ГМП [9].

Еще одной яркой причиной возмущений такого рода служат: магнетары – нейтронные звезды, обладающие исключительно сильным (до 10^{11} Тл) магнитным полем (по предположениям астрофизиков, в нашей галактике может существовать до $30 \cdot 10^6$ подобных звезд); пульсары, испускающие мощные, строго периодические импульсы электромагнитного излучения; квазары – яркие объекты в центре галактики, генерирующие в секунду в $\sim 10^{13}$ раз энергии больше, чем Солнце. Предполагается, что названные объекты потенциально обладают возможностью воздействовать на состояние магнитосферы Земли, но в силу ряда причин периодичность и степень их влияния на ГМП в настоящее время являются малоизученными.

- *Резонанс Шумана* – явление образования стоячих электромагнитных волн крайне низких, низких и сверхнизких частот между поверхностью Земли и ионосферой. Природой данного явления считают разряды молний, излучающие в окружающее пространство электромагнитную энергию, на частотах до 100 кГц, что определяет наличие устойчивых колебаний, имеющих фиксированные частоты, рассчитываемые согласно выражению:

$$f_n = \frac{cn}{L}, \quad (3)$$

где c – скорость света; L – длина экватора Земли ($L = 40075.7$ км); n – номер гармоники [9].

В строгом соответствии с выражением (3) набор из первых трех гармоник имеет значения: 7.5 Гц; 15 Гц; 22.5 Гц. Однако многократные экспериментальные исследования показали, что значения этих частот отличаются от теоретических расчетов и в реальности имеют значения: 7.83 ± 0.2 Гц; 14.10 ± 0.2 Гц; 20.30 ± 0.2 Гц для первых трех гармоник соответственно.

- Геомагнитные аномалии – внутриземные естественные источники искажения вектора магнитной индукции, обуславливающиеся намагниченностью верхних частей земной коры. Традиционным примером таковых являются: «Курская магнитная аномалия», «Восточно-Сибирская магнитная аномалия», «Бразильская магнитная аномалия», полосовые магнитные аномалии и т. п. Периодичность их существенных вариаций обычно составляет сотни и тысячи лет, поэтому при инженерно-технических расчетах частоту ГМВ такой природы происхождения допустимо считать равной нулю.

Техногенный фактор в крупных городах и промышленных центрах часто является доминирующей причиной локального искажения параметров ГМП.

В отличие от ГМВ, порождаемых природными явлениями и процессами, частотный спектр магнитных вариаций, наводимых в результате функционирования техносферы, достаточно широк и включает в себя частоты: от 0 Гц до радиочастот СВЧ диапазона.

При этом особого внимания заслуживают частоты так называемого промышленного диапазона. Такие преимущественно принадлежат к области сверхнизких частот и широко распространены как на промышленных предприятиях, так и в жилых помещениях.

Так, диапазон промышленных частот в России и Европе представлен частотой 50 Гц. В ряде некоторых иных государств распространение получила частота номиналом 60 Гц [10].

Главными источниками электромагнитного поля промышленной частоты являются различные типы распределителей, потребителей и генераторов электрической энергии (подстанции, ЛЭП сверхвысокого напряжения, электротранспорт, ТЭС, ГЭС, АЭС, приливные электростанции, разнообразные альтернативные генераторы электрической энергии и т. п. [10]).

Силовые характеристики ГМВ техногенной природы происхождения весьма неоднозначны и зависят от мощности энергетической установки, степени ее магнитного экранирования, расстояния между источником данного магнитного возмущения и местом его наблюдения, а также от наличия массивных ферромагнитных объектов, находящихся в области исследования.

Таким образом, очевидно, что явления, события и процессы, порождающие ГМВ, имеют различную и часто независимую природу происхождения, а наводимые ими локальные / глобальные искажения геомагнитосферы существенно разнятся как по амплитудно-частотным, так и по вероятностным оценкам и характери-

стикам. В результате реальная картина ГМП представляет собой сложнейшую суперпозицию во многом случайного набора ГМВ, вызванных целым рядом несогласованных событий. По этой причине целесообразность использования (с точки зрения информативности) при их оценке традиционных физических величин (напряженность магнитного поля, частота, плотность магнитного потока и т. п.) в некоторых случаях становится не оправданной.

В этой связи при изучении явлений, связанных с ГМВ, часто вводят такое понятие как геомагнитная активность – величина, выражающая степень возмущенности ГМП за определенный промежуток времени при взаимодействии корпускулярного излучения Солнца с магнитосферой Земли.

Количественной мерой геомагнитной активности являются так называемые индексы геомагнитной активности, число которых растет по мере развития представлений о солнечно-земных связях [11].

Приведем краткий обзор наиболее распространенных индексов геомагнитной активности, которые регулярно вычисляются магнитными обсерваториями различных стран в различных регионах нашей планеты.

С-индекс – один из первых и наиболее простых индексов геомагнитной активности. *С-индекс* характеризует возмущенность магнитного поля в течение суток и имеет трехбалльную шкалу оценки: 0, 1, 2. Наиболее спокойные периоды состояния магнитосферы оцениваются как «0», наиболее возмущенные – как «2». Обычно данная оценка имеет весьма субъективный характер, что является существенным недостатком данной меры геомагнитной активности.

С_т-индекс – индекс геомагнитной активности, характеризующий возмущенность ГМП в течение суток. Индекс *С_т* вычисляют как среднеарифметическое значение *С-индексов* примерно тридцати геомагнитных обсерваторий. В связи с этим он является более объективным по сравнению с изначальным *С-индексом*. Значения *С_т-индекса* принято вычислять с точностью до одной десятой, таким образом, они могут принимать значения от 0.0 до 2.0.

К-индекс – квазилогорифмический индекс (увеличивается на единицу с увеличением возмущенности в ~2 раза). Вычисляется по данным конкретной обсерватории за трехчасовой интервал времени и представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала мирового времени. Таким образом, для вычисления индекса берется изменение магнитного поля за

трехчасовой интервал, из него вычитается регулярная часть, и полученная величина переводится в *К-индекс*.

Важно понимать, что ГМВ резко зависят от географического местоположения пункта наблюдения, каждая геомагнитная обсерватория имеет индивидуальную ранжировку *К-индекса*. (всего используется 12 шкал). В качестве примера в табл. 1 приведены значения *К-индекса* для обсерватории «Москва».

Помимо количественной характеристики *К-индекса* также имеет качественную интерпретацию:

(0–2] – спокойное состояние магнитосферы Земли;

(2–3] – слабая геомагнитная активность;

[4] – возмущенное состояние магнитосферы Земли;

[5–6] – магнитная буря;

[7–9] – сильная магнитная буря.

При регистрации *К-индекса* возможны случаи ошибочного выбора шкалы для данной конкретной обсерватории, так как для большинства обсерваторий нижние пределы для $K = 9$ были установлены при рассмотрении позиционирования станций относительно геомагнитных (дипольных) координат. Как стало известно позже, расположение станций выгоднее рассматривать в исправленных геомагнитных координатах, которые учитывают реальное пространственное распределение ГМВ.

К_р-индекс – среднее значение *К-индексов*, определенных на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44° и 60° северной и южной геомагнитных широт. *К_р-индекс* определяется с точностью до 1/3 и имеет следующую форму записи:

- 1. (эквивалентно *К-индексу* равному 1-1/3);
- 1₀ (эквивалентно *К-индексу* равному 1);
- 1₊ (эквивалентно *К-индексу* равному 1+1/3).

А_р-индекс – определяется в единицах магнитного поля (нТл) и представляет среднее значение вариаций магнитосферы Земли, соответствующее данному *К_р-индексу* (табл. 2).

Также среди специалистов, помимо названных индексов, распространены *К_т*, *К_с*, *D_{st}*, *PC*, *AU*, *AL*, *AE*, *AO*, *C_p*, *C₉*, *R* и прочие индексы геомагнитной активности. Результаты их вычисления либо основываются на усредненном по планете значении параметров ГМВ, либо актуальны строго в точке наблюдения.

Таблица 1

Значения K -индексов для обсерватории «Москва»

ГМВ, нТл	до 5	от 5 до 10	от 10 до 20	от 20 до 40	от 40 до 70	от 70 до 120	от 120 до 200	от 200 до 330	от 330 до 550	от 550
K -индекс	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 2

Соответствие A_p -индексов K_p -индексам

K_p	0_0	0_+	1_-	1_0	1_+	2_-	2_0	2_+	3_-	3_0	3_+	4_-	4_0	4_+
A_p	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
K_p	5.	5 ₀	5 ₊	6.	6 ₀	6 ₊	7.	7 ₀	7 ₊	8.	8 ₀	8 ₊	9.	9 ₀
A_p	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Таблица 3

Классификационная схема ГМВ

Классификационные признаки ГМВ

<i>Генетический</i>	<i>Морфологический</i>	
Природа происхождения	Диапазон амплитуд $\pm \Delta B$, [нТл]	Диапазон частот f , [Гц] (период)
Внутриземные магнитные аномалии	до 20 000	~ 0
Солнечный ветер	50 – 1500	$2 \cdot 10^{-5}$ (10–72 ч.)
Вращение Земли вокруг Солнца	10 – 200	$\sim 31.7 \cdot 10^{-9}$ (365 дн., 6 ч, 9 мин., 10 с.)
Вращение Земли вокруг собственной оси	10–200	$\sim 11.6 \cdot 10^{-6}$ (23 ч., 56 мин., 4 с.)
Движение вещества и волновые процессы в жидком ядре Земли	10–120	$\sim 2.5 \cdot 10^{-10}$ (10–50 лет)
Вращение внешних видимых слоев Солнца (синдерический период)	40–60	$\sim 4.6 \cdot 10^{-7}$ (от 25 дн., 9ч. до 34 дн. 5 ч.)
11-летний цикл солнечной активности (цикл Швабе-Вольфа)	10–30	$\sim 7 \cdot 10^{-8}$ (10–11 лет.)
Вращение Луны вокруг Земли	2–5	$\sim 11.2 \cdot 10^{-6}$ (24 ч., 50 мин.)
Резонанс Шумана	$0.1 \cdot 10^{-3} - 1.8 \cdot 10^{-3}$	7–8

С целью повышения объективности оценки и регистрации ГМВ здесь предлагается к вычислению ряд дополнительных индексов геомагнитной активности:

M -индекс – абсолютное отклонение наблюдаемого значения ГМП в данный момент времени в точке, заданной пространственно-временными координатами, от вычисленного значения индукции ГМП внутриземных источников в той же точке.

M_{Σ} – абсолютное отклонение наблюдаемого значения ГМП в данный момент времени, в точке, заданной пространственно-временными координатами, от вычисленных значений индукции ГМП как суперпозиции поля ГМП внутриземных источников в той же точке и геомагнитных аномалий, установленных для данной конкретной области.

δM -индекс – относительное отклонение наблюдаемого значения индукции ГМП в данный момент времени в точке, заданной пространственно-временными координатами, от вычисленного значения индукции ГМП внутриземных источников в той же точке.

δM_{Σ} – относительное отклонение наблюдаемого значения ГМП в данный момент времени в точке, заданной пространственно-временными координатами, от вычисленного значения индукции ГМП как суперпозиции поля ГМП внутриземных источников в той же точке и геомагнитных аномалий, установленных для данной конкретной области.

Решая задачу классификации ГМВ, выделим ряд общих признаков, характерных этим вариациям в целом [12]:

Генетический – природа происхождения.

Морфологический: диапазон амплитуд $\Delta|B|$, нТл или [гамма] (1 гамма = 1 нТл); диапазон частот f , Гц или период T .

Дисперсионный – индексы геомагнитной активности.

В табл. 3 рассматривается вариант классификационной схемы ГМВ, включающий в себя наиболее изученные причины их возникновения, а также количественную оценку их амплитудно-частотных характеристик.

Анализируя представленные в табл. 3 данные, справедливо сделать заключение о том, ГМВ преимущественно укладываются в ампли-

тудно-частотный диапазон слабых низкочастотных магнитных полей, ограничивающийся пределами: $\Delta B = 3 \cdot 10^{-9} - 20 \cdot 10^{-6}$ Тл; $f = 0 - 8$ Гц. Таким образом, индукция ГМП у поверхности Земли на экваторе и у полюсов может быть оценена как ~ 30 мкТл $\pm \Delta B$ и ~ 65 мкТл $\pm \Delta B$ соответственно.

3. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ НА ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Естественные вариации ГМП (магнитные бури и аномалии) оказывают влияние на точность магнитометрических инклинометров. Зафиксировать недопустимые ГМВ, препятствующие нормальному режиму работы измерительной системы, можно на базе сигналов с первичных датчиков и оценке значения абсолютной погрешности угла магнитного наклона $\Delta \nu$.

Предлагается следующее решение задач оценки допустимого диапазона флуктуаций значения угла магнитного наклона и учета наличия магнитных аномалий.

Выходной сигнал магнитометра при условии наличия ГМВ принимает вид:

$$T_i' = T_i + \Delta T = k_T \cdot (H_i + \Delta H) + T_0, \quad (4)$$

где T_i – «чистый» сигнал, ΔT – помехи, k_T – коэффициент преобразования магнитометра, H_i – проекция напряженности ГМП на ось чувствительности i -го магнитометра, ΔH – ГМВ, обусловленные геомагнитными аномалиями, наличием обсадных колонн или магнитонеустойчивыми зонами, T_0 – нулевой сигнал.

Значение невозмущенного ГМП H рассчитывается для каждой точки Земли и для определенного периода времени [6]. Отклонения наблюдаемых значений магнитного поля Земли H' от нормального поля h являются аномалиями магнитного поля:

$$\Delta H = H' - H. \quad (5)$$

При скважинных исследованиях отклонения напряженности ГМП от прогнозируемого значения могут свидетельствовать о наличии геомагнитных аномалий, т. е. о расположении рудных пород вблизи скважины. Следовательно, помимо основной задачи определения пространственной ориентации нефтяных и газовых скважин можно использовать инклинометрические системы для решения геологических задач, а именно, осуществлять поиск тел с повышенной магнитной восприимчивостью и определять положение магнитных масс в околоскважинном пространстве.

Выражение (4) в безразмерном виде примет следующий вид:

$$\frac{T_i'}{k_T \cdot H} = \frac{T_i + \Delta T}{k_T \cdot H} = T_i^o + \frac{\varepsilon_h}{100\%}, \quad (6)$$

$$T_i^o = \frac{k_T \cdot H_i + T_0}{k_T \cdot H},$$

где T_i^o – выходной сигнал с магнитометра при условии отсутствия ГМВ в безразмерном виде; где ε_h – относительное отклонение магнитного поля Земли от нормы (значения сигнала, измеренного эмпирически на поверхности скважины и принятого за эталонное значение), выраженное в процентах.

Подставляя в формулу для расчета азимутального угла значения выходных сигналов магнитометров при условии отсутствия и наличия ГМВ, получим абсолютную погрешность измерения азимута:

$$\Delta \alpha = |\alpha_h - \alpha'_h|, \quad (7)$$

где

$$\alpha_h = \arctg \left[\frac{(T_1 \sin \varphi + T_2 \cos \varphi)}{T_2 \sin \varphi \cos \theta - T_1 \cos \varphi \cos \theta - T_3 \sin \theta} \right],$$

$$\alpha'_h = \arctg \left[\frac{(T_1' \sin \varphi + T_2' \cos \varphi)}{T_2' \sin \varphi \cos \theta - T_1' \cos \varphi \cos \theta - T_3' \sin \theta} \right].$$

Согласно РД 153-39.0-072-01 «Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах», основная погрешность измерения азимута должна удовлетворять условию $|\Delta \alpha| \leq 2^\circ$. Таким образом, анализ полученных значений $\Delta \alpha$ позволяет получить допустимое значение ГМВ, при котором инклинометрические системы удовлетворяют точностным требованиям. Например, для месторождений на широте $60,95^\circ$ допустимой, согласно расчетам, является величина ГМВ, равная 0,85 %. Превышение заданного значения свидетельствует о наличии недопустимых для магнитометрической инклинометрической системы ГМВ.

Характер распределения абсолютных погрешностей азимута и угла магнитного наклона во всем диапазоне измеряемых визирных φ и зенитных углов θ при $\varepsilon_h = 0.85\%$ и $\varphi_{ш} = 60,95^\circ$ представлены на рисунке.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что допустимая флуктуация абсолютной погрешности угла магнитного наклона должна удовлетворять условию $\Delta \nu \leq 0,493$. Ре-

зультаты расчетов для других месторождений представлены в табл. 4.

Рассчитанные значения допустимых флуктуаций абсолютной погрешности угла магнитного наклоения Δv позволяют судить о наличии или отсутствии ГМВ и являются критерием принятия решения о достоверности измерений на базе магнитометрических блоков. Значение допустимой флуктуации зависит от географических координат местности, времени и рассчитывается индивидуально для каждого месторождения.

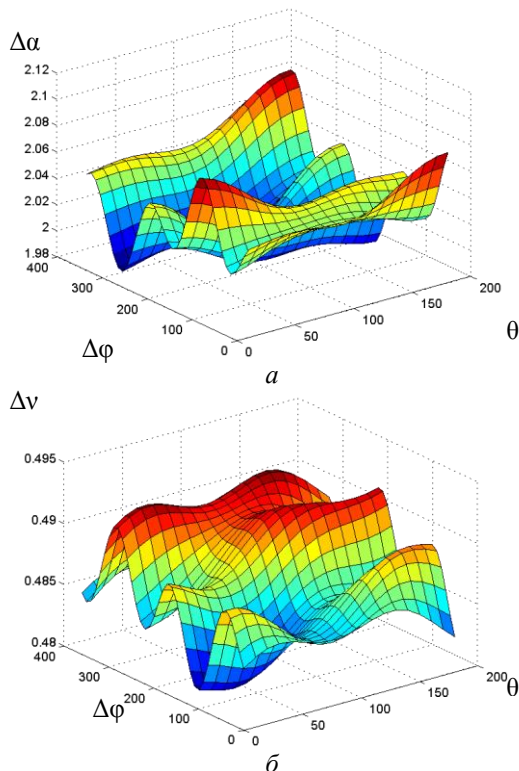


Рис. Характер распределения $\Delta\alpha$ (а) и Δv (б) во всем диапазоне измеряемых визирных φ и зенитных углов θ

Таблица 4

Допустимые значения ГМВ ε_h и абсолютной погрешности угла магнитного наклоения Δv

Широта, град	56,05	60,95	63,2	65,7	67,45	70
ε_h , %	1	0,85	0,75	0,65	0,6	0,5
Δv , град	<0,586	<0,493	<0,424	<0,367	<0,348	<0,289

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сравнительно простой принцип работы, невысокая стоимость и широкое распространение делают магнитометрические инклинометры не просто важным инструментом, используемым в процессе бурения. Возможно применение инклинометров такого типа для решения принципиально иных задач,

на первый взгляд, не имеющих прямого отношения к их непосредственному предназначению – бурению. Одна из таких задач относится к геологии и ориентирована на поиск тел с повышенной магнитной восприимчивостью и определение положения магнитных масс в околоскважинном пространстве.

При этом велика роль определения природы геомагнитных вариаций, оказывающих прямое и косвенное воздействие на показания магнитометрических инклинометров. Представленная в работе методика расчета значений допустимых флуктуаций абсолютной погрешности угла магнитного наклоения позволяет судить о наличии или отсутствии геомагнитных вариаций. Этот факт является критерием принятия решения о достоверности измерений на базе магнитометрических блоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев А. В.** Моделирование и исследование эффекта геомагнитной псевдобури // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 29–36. [[A. V. Vorobev, *Modeling and analyses of geomagnetic pseudostorm effect*, (in Russian), *Geoinformatica*, 2013, № 1, pp. 29–36.]]
2. **Исаченко В. Х.** Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987. 216 с. [[V. Kh. Isachenko, *Inclinometer wells*. Moscow: Nedra, 1987. 216 p. (in Russian).]]
3. **Ковшов Г. Н., Алимбеков Р. И., Жибер А. В.** Инклинометры. Основы теории и проектирования. Уфа: Гилем, 1998. 380 с. [[G. N. Kovshov, R. I. Alimbekov, A. V. Zhiber, *Inclinometers. Theory and development*. Ufa: Gilem, 1998. (in Russian).]]
4. **Ковшов Г. Н., Коловертнов Г. Ю.** Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: УГНТУ, 2001. 228 с. [[G. N. Kovshov, G. Yu. Kolovertnov, *Gauges spatial orientation while drilling wells*. Ufa: UGNTU, 2001. 228 p. (in Russian).]]
5. **Кузеванов С. А.** Оптимальный выбор датчиков для инклинометров // Каротажник. 2007. № 81. С. 103–110. [[S. A. Kuzevanov, "Optimal selection of sensors for inclinometers," (in Russian), *Karotazhnik*, no. 1, pp. 103–110, 2007.]]
6. **Гусев Е. В.** Методы полевой геофизики. Томск: ТПУ, 2012. 216 с. [[E. V. Gusev, *Methods of field geophysics*. Tomsk: TPU, 2012.]]
7. **Генерация** электрического поля в магнитосфере Земли, обусловленная процессами в головной ударной волне / Е. А. Понамарев и др. // Исследовано в России. 2004. С. 3–13. [[E. A. Ponomarev, et al., "Generation of an electric field in the Earth's magnetosphere caused by processes in the bow shock," (in Russian), *Russian Research*, pp. 3–13, 2004.]]
8. **Эгеланд А., Хольтер О., Лмхольт А.** Космическая геофизика М.: Мир, 1976. С. 31–33. [[A. Egeland, O. Holter, A. Lmholt, *Space Geophysics*, (in Russian). Moscow: Mir, 1976, pp. 31–33.]]
9. **Schlegel K., Füllekrug M.**, "Weltweite Ortung von Blitzen: 50 Jahre Schumann-Resonanzen," *Physik in unserer Zeit*, 33 (6), pp. 256–261, 2002.

10. **Воробьев А. В., Гарипова Г. Т.** Перспективы модернизации методов контроля параметров электроэнергии электрогенерирующих и электропотребляющих систем // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10, № 1. С. 132–135 [[A. V. Vorobev, G. T. Garipova, "Prospects for modernization of control methods and parameters of electric power electricity systems," (in Russian), *Neftegazovoe delo*, vol. 10, no. 1, pp. 132-135, 2012.]]

11. **Заболотная Н. А.** Индексы геомагнитной активности: справочное пособие. М.: Физическая мысль, 2007. С. 37–73. [[N. A. Zabolotnaya, *Geomagnetic activity indexes*. Moscow: Physicheskaya mysl, 2007, pp. 37-33, (in Russian).]]

12. **Воробьев А. В.** Вопросы проектирования цифровых геомагнитных обсерваторий. Berlin: LAP Lambert Academic Publishing G mbh & Co. KG, 2012. С. 10–20. [[A. V. Vorobev, *Problems of digital geomagnetic observatories development*, (in Russian). LAP Lambert Academic Publishing G mbh & Co. KG, Berlin, 2012, pp. 10-20.]]

ОБ АВТОРАХ

ВОРОБЬЕВ Андрей Владимирович, доц., вед. науч. сотр. каф. автоматизированных систем управления. М-р по электронике и микроэлектронике (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по инф.-изм. и упр. системам (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. геоинформ. магнитометрич. систем.

ШАКИРОВА Гульнара Равилевна, доц. каф. автоматизированных систем управления. Дипл. инж.-с/техн. (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по мат. и прогр. обеспечению выч. машин, комплексов и комп. сетей (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. иерархич. моделей, сит. управления, веб-технологий, геоинформ. магнитометрич. систем.

ИВАНОВА Галина Алексеевна, ст. преп. каф. теор. основ электротехники. Дип. инж. по средствам связи с подвижными объектами (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. исп. гироскопических приборов в системах ориентации и навигации подвижных объектов.

METADATA

Title: Research and analyses of natural factors, which are influence on metrological characteristics of magnetometric inclinometers.

Authors: A. V. Vorobev, G. R. Shakirova, G. A. Ivanova

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: gimslab@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 123-131, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper is concerned with research and analyses of natural factors, which influence on inclinometric systems parameters. The authors give a brief overview of known classes of inclinometric systems, their main characteristics are discussed. The principle of magnetometric inclinometers performance is discussed. Taking into account the possibilities and performance principles of magnetometric inclinometers the authors suggest and formalize the mechanism of magnetometric inclinometer application in geology.

Key words: geomagnetic field; geomagnetic variations; inclinometric system.

About authors:

VOROBEV, Andrei Vladimirovich, Assoc. Prof., Dept. of Automated Systems. Master of Electronics & Microelectronics (UGATU, 2006). PhD (UGATU, 2009).

SHAKIROVA, Gulnara Ravilevna, Assoc. Prof., Dept. of Automated Systems. Dipl. Engineer on Automated Management Systems (UGATU, 2005). PhD (UGATU, 2008).

IVANOVA, Galina Alekseevna, Senior Teacher, Dept. of Theoretical Bases of Electrotechnics. Dipl. Engineer on Moving Objects Communication Mechanisms (UGATU, 2006). PhD (UGATU, 2013).