УДК 004.65/ 531.746

СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ВЕБ-СЕРВИСА

Воробьев А.В., Шакирова Г.Р., Иванова Г.А.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, e-mail: gimslab@yandex.ru

Представлен комплексный подход к организации системы поддержки принятия решения при планировании и проведении инклинометрических исследований. Предлагаемая концепция основана на привлечении информации с картографического веб-сервиса и применении синтезированного алгоритма принятия решения. Разработанное веб-приложение основано на методике решения задач аналитического контроля, исследования, моделирования и визуализации параметров геомагнитного поля. Реализованная процедура сравнения допустимых значений геомагнитных вариаций с текущими позволяет в режиме реального времени предоставить информацию, необходимую для оценки возможности проведения инклинометрических работ. Разработанный алгоритм принятия решения для гибридной инклинометрической системы позволяет делать вывод о достоверности измерений на базе магнитометрического или гироскопического модулей. В качестве критериев выбора достоверного измерения используется априорная информация о наличии магнитных возмущений, сигналы с первичных датчиков и привязка к широте местности. Показано, что включение в скважинный модуль первичных датчиков, чувствительных к различным физическим величинам, позволяет расширить область применения инклинометрических систем, сократить временные и эксплуатационные издержки.

Ключевые слова: картографический веб-сервис, геомагнитные вариации, гибридные инклинометрические системы, система принятия решений

DECISION MAKING SYSTEM BASED ON CARTOGRAPHIC WEB SERVICE FOR A HYBRID DIRECTIONAL SURVEY TOOL

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

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: gimslab@yandex.ru

This paper considers a complex approach in designing decision making support when planning and running inclinometry investigations. A concept being proposed is based on utilizing information provided by cartographic web service and applying specific decision making algorithm. The developed Web application is based on a technology of solving problems of analytical control, examination, modeling and visualization of geomagnetic field parameters. The implemented comparison procedure for evaluating observed geomagnetic variations against their acceptable values allows real-time provisioning of information necessary to assess a possibility of directional survey. The proposed decision making algorithm for a hybrid inclinometer system is able to decide upon validity of measurements made with its magnetometer and gyroscopic inclinometer modules. Proposed decision criterions are information about magnetic field disturbances, sensor data and knowledge of location latitude. The papers shows that inclusion of sensors for different physical quantities allows to extend application area of inclinometry measurement system and to reduce times and costs of measurements.

Keywords: cartographic web service, geomagnetic variations, hybrid inclinometer system, decision making system

В настоящее время в области информационно-измерительных систем, предназначенных для контроля пространственного положения скважины, намечаются тенденции к разработке гибридных инклинометрических систем (ИС) [1, 5, 6].

Гибридная ИС является результатом интеграции традиционных гироскопических и магнитометрических инклинометров в единый измерительный модуль. Структурная избыточность, организованная путем объединения первичных датчиков, основанных на различных физических принципах работы, позволяет организовать процедуру резервирования и расширить функциональные возможности ИС. Помимо основной задачи пространственной ориентации скважины гибридная ИС позволяет контролировать целостность стенок обсадных труб при восстановлении старых месторождений, осуществлять поиск тел с повышенной магнитной восприимчивостью и определять положение магнитных масс [1].

Очевидно, что для анализа возможности проведения измерений, полноценного функционирования ИС со структурной избыточностью, последующей оценки достоверности измерений на базе гироскопических или магнитометрических датчиков необходима реализация комплексной процедуры принятия решения. Однако в опубликованных на сегодняшний день научных работах, посвященных гибридным ИС, упоминания о подобных системах отсутствуют.

Авторами настоящей работы предлагается система поддержки принятия решения

для гибридной ИС, алгоритм работы которой основан на процедуре регистрации недопустимых магнитных аномалий, и критерии выбора достоверного измерения.

Процедура регистрации недопустимых магнитных аномалий

Предлагаемая концепция информационной поддержки принятия решения с привлечением технологии картографического вебсервиса основана на методике решения задач аналитического контроля, исследования, моделирования и визуализации параметров геомагнитного поля (ГМП) и его вариаций, и оценки их влияния на информационно-измерительную технику и оборудование.

Оценка текущего значения ГМВ реализуется посредством процедуры сравнения. Для этого текущие параметры ГМП сравниваются с эталонными значениями, например с рассчитанными значениями вектора ГМП внутриземных источников в заданных пространственно-временных координатах [2, 3]. Проведенный анализ позволяет судить о степени отклонения и характере распределения полученных данных от известных эталонных значений, наличии или отсутствии ГМВ в исследуемой области, а также оценить размеры и силовые характеристики выявленных аномалий.

Разработанное с этой целью вебприложение отличается возможностью 2D/3D-визулизации параметров ГМП и его вариаций в режиме реального времени, а также включает в себя функцию автоматизированного анализа параметров ГМВ с целью решения задачи их идентификации по природе происхождения и автоматического формирования географических карт специального назначения для поддержки принятия решения при планировании и проведении инклинометрических исследований.

Созданное веб-приложение функционирует в строгом соответствии с требованиями, предъявляемыми к приложениям данного класса. Единственное, что необходимо пользователю для его эффективного использования, – это так называемый пользовательский агент, или, как его чаще называют, веб-браузер [3].

С помощью радиокнопок пользователь выбирает режим ввода геопространственных координат: вручную или из списка из базы данных. Так, к примеру, выбрав режим ввода значений широты и долготы, пользователь нажимает на кнопку «Поиск». В результате выполняется перерисовка карты применительно к введенным координатам (в информационной области) и расчет параметров геомагнитного поля (в аналитической области).

Гибкость представленного программного обеспечения обусловлена его кроссплатформенностью: приложение одинаково эффективно работает на уровне как персонального стационарного компьютера, так и для мобильных устройств.

Решение о возможности проведения инклинометрических работ принимается по результатам сравнения допустимых значений ГМВ с текущими. Оценку допустимых ГМВ предложено реализовывать следующим образом.

В гибридной ИС блок акселерометров измеряет проекции ускорения свободного падения g_i на оси, связанные с корпусом скважинного модуля, блок гироскопов – проекции угловой скорости Земли ω_i, блок магнитометров – проекции напряженности магнитного поля Земли h_i.

Известно, что погрешность магнитометрических датчиков зависит от наличия намагниченных масс, что в свою очередь обуславливает невозможность работы магнитометрических инклинометров в обсаженных скважинах и в условиях магнитных аномалий [5, 6].

Таким образом, говорить о достоверности измерений на базе магнитометрического модуля можно только при условии отсутствия недопустимых ГМВ.

Выходной сигнал магнитометра при условии наличия ГМВ принимает вид

$$T_i' = T_i + \Delta T = k_T (H_i + \Delta H) + T_0, \qquad (1)$$

где T_i – «чистый» сигнал в условиях отсутствия помех; 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 [4]. Отклонения наблюдаемых значений магнитного поля Земли H' от нормального поля H являются аномалиями магнитного поля или ГМВ:

$$\Delta H = H' - H. \qquad (2)$$

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 гибридные ИС для решения геологических задач, а именно осуществлять поиск тел с повышенной магнитной

восприимчивостью и определять положение магнитных масс в околоскважинном пространстве.

В результате нормирования выражения (1) получим

$$\frac{T_i'}{k_T \cdot H} = \frac{T_i + \Delta T}{k_T \cdot H} = T_i^o + \frac{\varepsilon_h}{100\%}; \qquad T_i^o = \frac{k_T \cdot H_i + T_0}{k_T \cdot H}, \tag{3}$$

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, 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:

$$\Delta\alpha = \left|\alpha_h - \alpha_h'\right|, \tag{4}$$

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

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

где θ – зенитный угол; φ – визирный угол.

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 $\left|\Delta\alpha\right| \le 2$ град. Таким образом, анализ полученных значений Δα позволяет получить допустимое значение ГМВ, при котором гибридная ИС удовлетворяет точностным требованиям.

Превышение заданного значения свидетельствует о наличии недопустимых для магнитометрического блока ГМВ и проведении измерений только на базе гироскопов. Картина распределения допустимых ГМВ по всей поверхности земного шара представлена на рис. 1.

Алгоритм принятия решения о достоверности измерений

Если согласно результатам, представленным на специализированном вебсервисе, уровень текущих или прогнозируемых ГМВ не превышает допустимый уровень, необходимо проводить измерения на базе всех трех типов датчиков с последующим анализом и оценкой степени достоверности результатов.

В качестве условий, позволяющих судить о достоверности измерений на базе гироскопических и магнитометрических датчиков, предложено использовать отклонения экспериментальных показаний гироскопов ΔD и магнитометров ΔT от опорных значений, абсолютную погрешность широты месторождения $\Delta\varphi_ш$ и угла магнитного наклонения Δv, а также условие пересечения интервалов:

$$\alpha \in \begin{cases} (\alpha_\omega - 2;\ \alpha_\omega + 2), \\ (\alpha_h - 2;\ \alpha_h + 2). \end{cases}$$

где α_ω, α_h – азимут, рассчитанный для комбинаций $(\vec{g}, \vec{\omega})$ и $(\vec{h}, \vec{g})$ соответственно. С обоснованием выбранных условий и результатами расчетов согласно представленным критериям можно ознакомиться в работе [5].

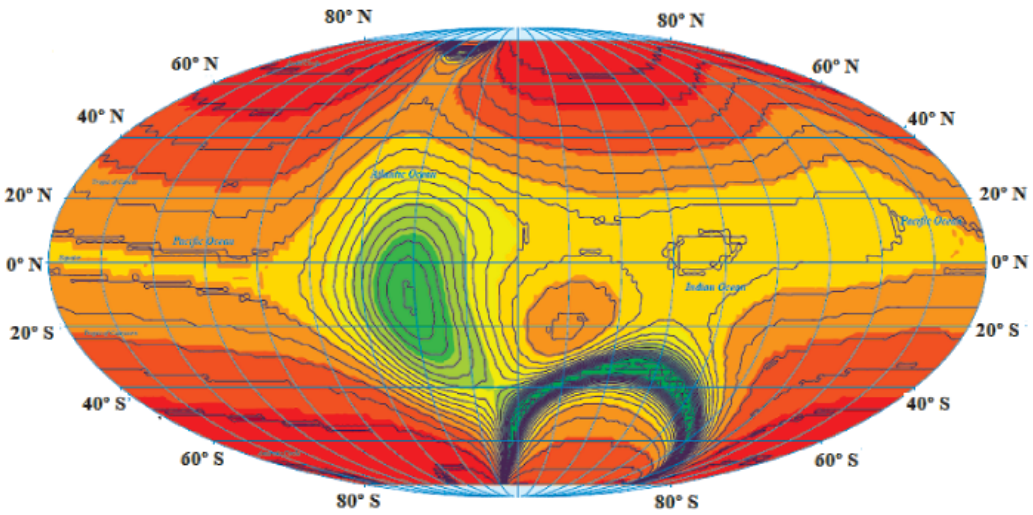

Рис. 1. Изолинии допустимых ГМВ при инклинометрии скважин

Разработанный алгоритм основан на попарном сравнении величин ΔD и ΔT, $\Delta\varphi_ш$ и Δv, а также проверке наличия или отсутствия пересечения интервалов. Результатом принятия решения являются следующие варианты:

$$\alpha = \alpha_h;\ \alpha = \alpha_\omega;\ \alpha = \frac{\alpha_h + \alpha_\omega}{2}\ [2].$$

Алгоритм принятия решения реализуется следующим образом. В наземный блок гибридной ИС поступают сигналы, измеренные скважинным модулем (A_i, D_i, T_i (i = 1, 2, 3) – выходные сигналы, поступающие с триады акселерометров, гироскопов и магнитометров). Далее происходит расчет пространственных углов (α_ω, α_h, φ, θ), а также широты месторождения $\varphi_ш$ и угла магнитного наклонения v'. На следующем шаге рассчитываются отклонения ΔD и ΔT, абсолютные погрешности $\Delta\varphi_ш$, Δv. Следующий этап – реализация процедуры выбора достоверного значения α из полученных α_ω, α_h.

Результаты тестирования алгоритма подтвердили эффективность включения первичных датчиков различной физической природы в измерительный модуль ИС. Так, например, на широте $\Delta\varphi_ш = 56{,}05°$ точность восстановления азимута при ГМВ $\varepsilon_h = 1{,}5\%$ увеличилась в 1,66 раза, а при $\varepsilon_h = 3\%$ в 3,83 раза (рис. 2), на широте $\Delta\varphi_ш = 67{,}45°$ в 2,62 и 6,56 раза соответственно (рис. 3). В среднем при уровне ГМВ $\varepsilon_h = 3\%$ точность восстановления азимута на средних широтах увеличивается в 5,19 раза, а на высоких в 7,68 раза.

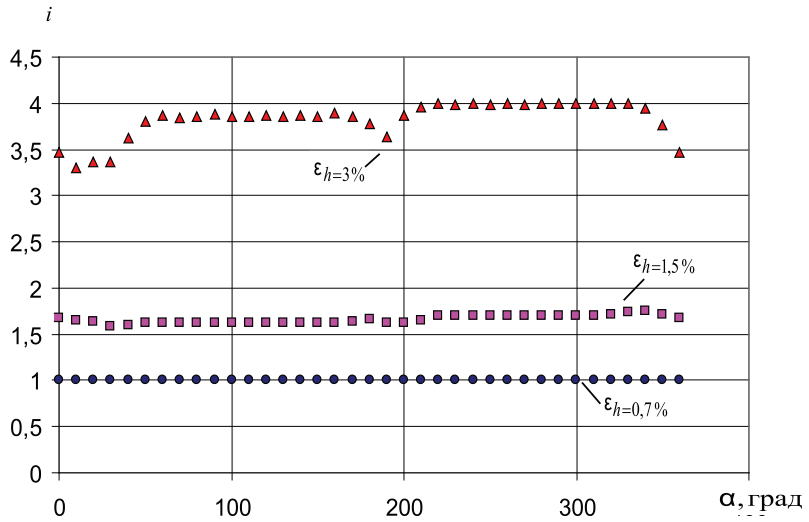

Рис. 2. Отношение (i) абсолютных погрешностей азимута до и после реализации алгоритма принятия решения в зависимости от α ($\varphi_ш$ = 56,05°)

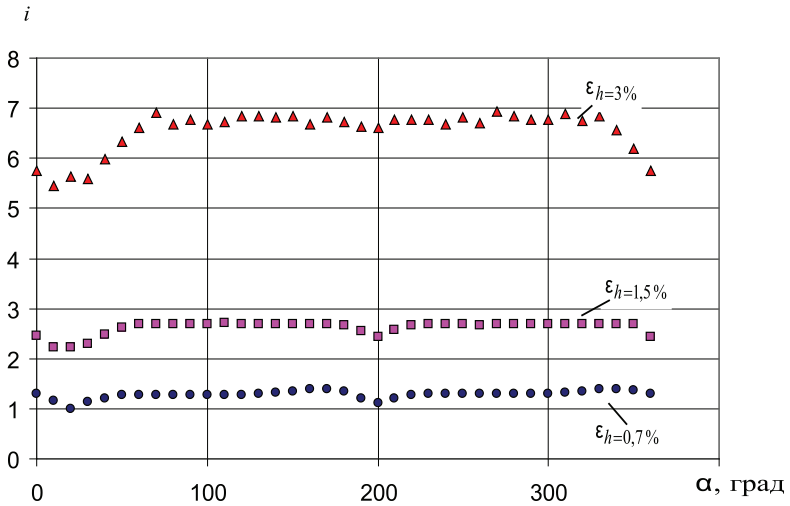

Рис. 3. Отношение (i) абсолютных погрешностей азимута до и после реализации алгоритма принятия решения в зависимости от α ($\varphi_ш$ = 67,45°)

Заключение и выводы

Таким образом, методика расчета параметров ГМП и его вариаций, картографическая визуализация областей геомагнитных аномалий в двух- и трехмерном виде с ранжированием по степени возможного воздействия на показания информационно-измерительной техники, сравнение допустимых значений ГМВ с текущими позволяет в режиме реального времени предоставить информацию, необходимую для поддержки принятия решения при планировании и проведении инклинометрических исследований. В свою очередь, комплексный подход, основанный на привлечении информации с картографического веб-сервиса, и применение синтезированного алгоритма принятия решения, позволяют повысить достоверность измерений, надежность и точность ИС, сократить временные и стоимостные затраты.

Работа поддержана грантами РФФИ и грантом Президента Российской Федерации: № 14-07-00260-а, 14-07-31344-мол_а, 15-17-20002-Д_С, 15-07-02731-а, МК-5340.2015.9.

Список литературы

1. Баландин А.И., Барышников К. О., Котенков М. И. Гибридный гиромагнитометрический инклинометр // Навигация и управление движением: рефераты докладов XV конференции молодых ученых. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013. URL: http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2013/refs (дата обращения: 10.04.2015).

2. Воробьев А.В. Вопросы проектирования цифровых геомагнитных обсерваторий (монография) – Berlin: LAP Lambert Academic Publishing G mbh & Co. KG, 2012. – 133 с.

3. Воробьев А.В., Шакирова Г.Р. Автоматизированный анализ невозмущенного геомагнитного поля на основе технологии картографических веб-сервисов // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 5 (58). – С. 177–187.

4. Гусев Е.В. Методы полевой геофизики – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.–216 с.

5. Заико А.И., Иванова Г.А. Инклинометрическая система для подземной пространственной ориентации // Измерительная техника. – 2014. – № 7. – С. 52–56.

6. Ковшов Г.Н., Коловертнов Г.Ю., Коловертнов Ю.Д., Федоров С.Н. Устройство для определения углов искривления скважины // Патент РФ № 2166084, опубл. 27.04.01.

References

1. Balandin A.I., Baryshnikov K.O., Kontenkov M.I. *Navigatsiya i upravlenie dvizneniem: referaty docladov XV konferentsyi molodykh uchenykh*. Saint Petersburg, 2013. Available at: http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2013/refs (accessed 10 April 2015).

2. Vorobev A.V. *Voprosy proektirovaniya tsifrovyx geomagnitnykh observatoriy* (Problems of digital geomagnetic observatories development). Berlin: Lambert Academic Publishing G mbh & Co. KG, 2012. 133 p.

3. Vorobev A.V., Shakirova G.R. *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 5 (58), pp. 177–187.

4. Gysev E.V. *Metody polevoy geofiziki* (Methods of field geophysics). Tomsk: TPU, 2012. 216 p.

5. Zaiko A.I., Ivanova G.A. *Measurement Techniques*, 2014, no. 7, pp. 52–56.

6. *Patent RU № 2166084*.

Рецензенты:

Веревкин А.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа;

Даринцев О.В., д.т.н., ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией «Робототехника и управление в технических системах», ФГБУН «Институт механики им. Р.Р. Мавлютова», г. Уфа.