

Построения поля магнитного склонения на основе модуля главной компоненты магнитного поля Земли и аэромагнитных данных на примере восточной части Республики Татарстан.

Э.В. Утемов (ФГАОУ ВО КФУ), Д.И. Хасанов (ФГАОУ ВО КФУ), А.В. Старовойтов (ФГАОУ ВО КФУ), Б.М. Насыртдинов (ФГАОУ ВО КФУ)

Введение

В настоящее время накоплена база данных по бурению глубоких, сверхглубоких и горизонтальных скважин. В связи с тем, что бурение этих скважин проводилось в разное время в настоящий момент возникла необходимость приведения географических координат инклинометрии стволов скважин в единую систему координат. Одним из важных параметров, которые позволяют решить эту задачу является магнитное склонение. В данной работе представлены результаты моделирования и измерения склонения магнитного поля в пределах Юго-Востока Татарстана.

Данные по магнитному склонению можно получить из современных моделей магнитного поля Земли. Модели главного магнитного поля Земли и его вековой вариации строятся путём разложения методом сферического гармонического анализа (СГА) среднегодовых значений поля на основе компилирования данных наблюдений обсерваторий мировой сети, спутниковых, аэромагнитных, наземных и гидромагнитных съёмок, например: The World Magnetic Model (WMM, 12 степень), International Geomagnetic Reference Field (IGRF, 13 степень), Enhanced Magnetic Model (EMM, 790 степень). В настоящее время времени существует несколько проблематик которые не позволяют применять данные напрямую: Низкая детальность выходных данных. Даже наиболее детальное разложение магнитного поля в рамках модели EMM ($n = 790$) не позволяет получить пространственное разрешение, превышающее 51 км; в силу глобальности и стационарности решений уравнения Лапласа в рамках метода (СГА) невозможно повысить детальность выходных данных за счет добавления входных геомагнитных данных на сравнительно малой территории; в рамках СГА затруднен учет локальных особенностей поля (поля магнитного склонения не аддитивны).

Метод полевых измерений

Измерения величины магнитного склонения проводились на 31 точке с тремя контрольными измерениями (рисунок 1). Общая характеристика работ заключается в том, что на выбранном участке в пределах пункта наблюдения закреплялась произвольная, соответствующая требованиям, точка. В этой точке посредством буссоли находилось направление на магнитный север. В указанном направлении мерной лентой откладывался отрезок равный примерно 100 м. На втором конце отрезка также закреплялась точка. В направлении равном 90° от первой точки, определяемом по буссоли на восток или на запад (в зависимости от условий местности) также откладывался отрезок порядка 100 м. На втором его конце закреплялась третья точка. Для съёмки использовался следующий аппаратный комплекс:

1. Геодезический приемник Trimble R10, R8;
2. Геодезические буссоли;
3. Феррозондовый деклинометр LEM1-204 на базе специального немагнитного теодолита ЗТ2КП, в данной модели использован шкаловой отсчетный микроскоп с ценой деления в $2''$
4. Абсолютный оверхаузеровский магнитометр MMPOS-1.

Математические расчеты модели

Для создания модели и повышения разрешающей способности выходных данных был сформированы следующие этапы работ:

1. На основе модели главного магнитного поля (дипольное поле и поля мировых аномалий) определить семейство глобальных диполей (10-15 диполей), реконструирующих главное магнитное поле Земли с заданной точностью.
2. На основе базы данных «Гравимаг» определить локальные аномалиеобразующие магнитные диполи в пределах исследуемого участка.
3. Построить полную геомагнитную модель в пределах исследуемого участка как суперпозицию полей найденных глобальных и локальных магнитных диполей.

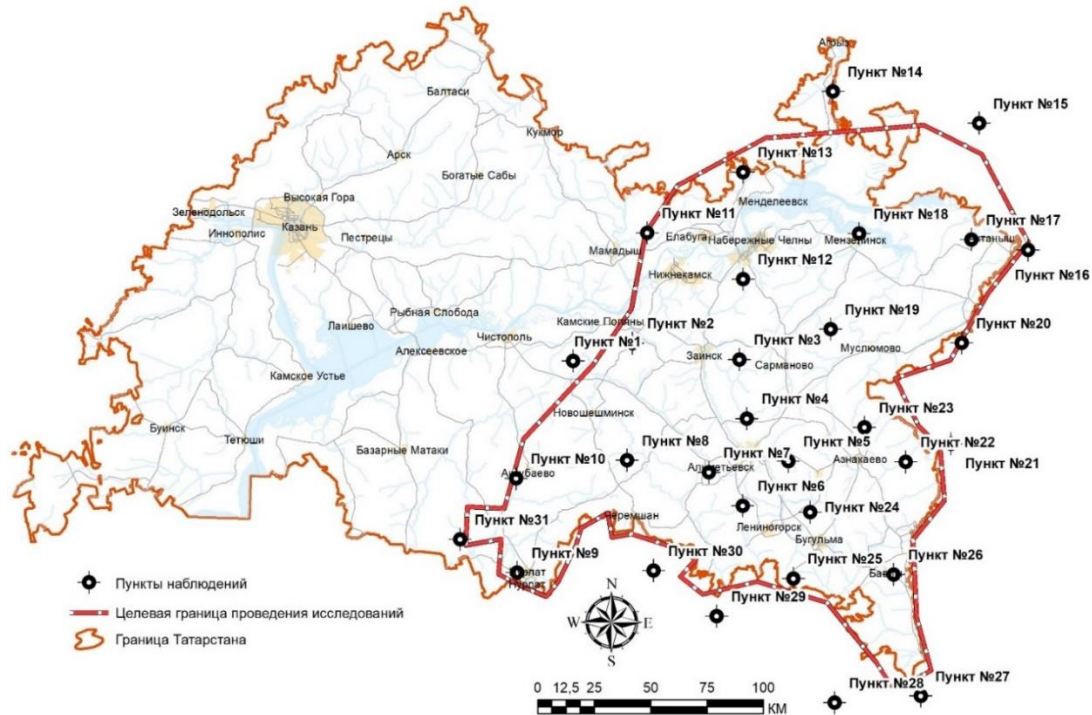


Рисунок 1. Расположение точек наблюдения для натуральных измерений магнитного склонения.

Согласно Ю.И. Блоху [1, 2] магнитный потенциал равен:
$$U = \frac{m_d}{q^2} \cos\theta \quad (1)$$

где m_d – магнитный момент диполя, q – расстояние от центра диполя до точки наблюдения, θ – угол между осью диполя и линией, соединяющей центр диполя и точку наблюдения.

Будем использовать геоцентрическую прямоугольную систему координат: начало координат поместим в центр Земли, ось x направим к нулевому меридиану, а ось z – вдоль земной оси на север. Представим формулу (1) в векторной форме (рисунок 2):
$$U = m_d \frac{(\vec{p}, \vec{q})}{(\vec{q}, \vec{q})^{3/2}} \quad (2)$$

Единичный вектор \vec{p} направления оси диполя от отрицательной магнитной массы к положительной:
$$\vec{p} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k} \quad (3)$$

где a , b и c – направляющие косинусы.

Дифференцированием правой части (2), получим компоненты градиента магнитного потенциала:

$$\begin{aligned} U_x &= m_d \frac{a(\vec{q}, \vec{q}) - 3(x - x_0)(\vec{p}, \vec{q})}{(\vec{q}, \vec{q})^{5/2}} \\ U_y &= m_d \frac{b(\vec{q}, \vec{q}) - 3(y - y_0)(\vec{p}, \vec{q})}{(\vec{q}, \vec{q})^{5/2}} \\ U_z &= m_d \frac{c(\vec{q}, \vec{q}) - 3(z - z_0)(\vec{p}, \vec{q})}{(\vec{q}, \vec{q})^{5/2}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{Откуда } \nabla U = \frac{m_d}{(\vec{q}, \vec{q})^{5/2}} (\vec{p}(\vec{q}, \vec{q}) - 3\vec{q}(\vec{p}, \vec{q})) \quad (5)$$

Модуль полного вектора напряженности поля магнитного диполя одинаков в любой системе координат и равен $|\vec{T}| = (\nabla U, \nabla U)^{1/2} = \frac{m_d \sqrt{1+3(\vec{p}, \vec{q})^2 / (\vec{q}, \vec{q})}}{(\vec{q}, \vec{q})^2}$ (6)

В качестве эталонных данных мировых магнитных аномалий использовались данные модели The World Magnetic Model, (WMM), разработанной совместно Национальным центром экологической информации (NCEI, США) и Британской геологической службой (BGS). Расчетная модель представляла набор из 14 магнитных диполей с семью неизвестными параметрами (магнитный момент, три координаты центра диполя и три направляющих косинуса вектора оси диполя). Поиск решения осуществлялся путем минимизации функционала

$$\mu(m_{d_1}, \dots, m_{d_m}, \vec{r}_1, \dots, \vec{r}_m, \vec{p}_1, \dots, \vec{p}_m) = \sum_{k=1}^n |\vec{w}_k^{\text{ext}} - \sum_j^m \vec{w}_{k,j}^{\text{int}}|^2 \quad (7)$$

де \vec{w}_k^{ext} – градиент магнитного потенциала по данным модели WMM,
 $\vec{w}_{k,j}^{\text{int}} = A_k \nabla U_{k,j}$ – градиент магнитного потенциала j -го диполя в k -ой точке наблюдения.

Определение «источников» магнитного поля – аномалиеобразующих магнитных диполей осуществлялось по методике, основанной на использовании «естественного» вейвлет-преобразования [3, 4]. В случае одиночного вертикального магнитного диполя вейвлет-спектр его магнитного поля позволяет определить магнитный момент и положение центра диполя.

На рисунке 2 представлена карта аномалий модуля полного вектора T_a магнитного поля по данным аэромагнитной съемки (А) и карта восстановленного поля T_a по результатам решения прямой задачи для найденных аномалиеобразующих магнитных диполей. Точками обозначены положения центров диполей.

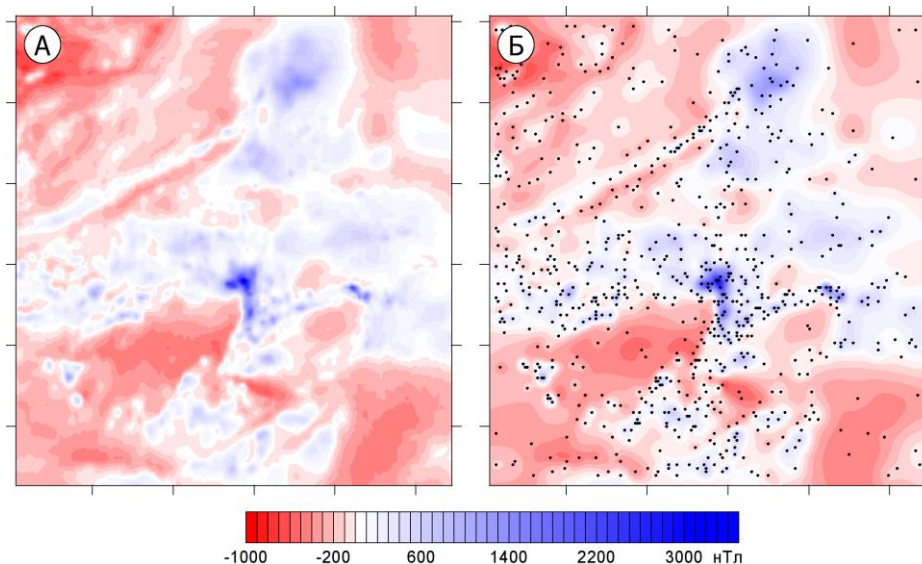


Рисунок 2. *Карты аномалий модуля полного вектора магнитного поля по данным аэромагнитной съемки (А) и карта восстановленного магнитного поля T_a по результатам решения прямой задачи для найденных аномалиеобразующих вертикальных магнитных диполей (Б)*

Выводы

В результате был создан программный пакет «TatDeclination» позволяющий по исходным географическим координатам и альтитуде рассчитываемого пункта наблюдений получить

значения модуля полного вектора T_a магнитного поля, его склонение D и наклонение I в любой точке пространства.

Сравнение полевых наблюдаемых (31 пункт) и расчетных в тех же точках (программа «TatDeclination») значений магнитного склонения свидетельствуют о хорошей сходимости результатов (рисунок 3). Коэффициент выборочной корреляции $k = 0.927$, среднеквадратическое расхождение – 0.417° или $25.02'$.

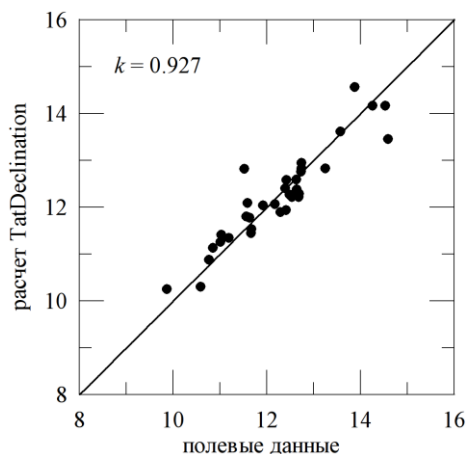


Рисунок 3. Зависимость наблюдаемых и рассчитанных значений магнитного склонения

Библиография

1. Ю.И. Блох Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий Учебное пособие для студентов университетов и вузов, обучающихся по специальности 080400 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых», Москва, 2009.
2. Новиков К.В. Магниторазведка: Учебное пособие. Часть 1. – М.: 2013.
3. Утемов Э.В., Нургалиев Д.К. Естественные вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения/ Физика Земли, 2005, №4, с.88-96.
4. Утемов Э.В., Нургалиев Д.К., Хамидуллина Г.С. Технология обработки и интерпретации гравиметрических данных на основе "естественного" вейвлет-преобразования, Ученые записки Казанского университета, Естественные науки, том 152, кн.3, с.208-222. 2010.

References

1. Yu.I. Bloch Interpretation of gravitational and magnetic anomalies Textbook for university and university students studying in the specialty 080400 "Geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits", Moscow, 2009. (In Russian)
2. Novikov K.V. Magnetic exploration: A textbook. Part 1. – Moscow: 2013. (In Russian)
3. Utemov E.V., Nourgaliev D.K. Natural Wavelet Transformations of Gravity Data: Theory and Applications. Physics of the Solid Earth, v.41, No.4, 2005, pp.88-96. (In Russian)
4. Utemov E.V., Nurgaliev D.K., Khamidullina G.S. Technology of processing and interpretation of gravimetric data based on the "natural" wavelet transform, Scientific Notes of Kazan University, Natural Sciences, volume 152, book 3, pp.208-222. 2010.. (In Russian)