

Индуктивные и ориентационные эффекты геомагнитных вариаций на юго-западе Зареченской магнитной аномалии (восточное побережье озера Байкал)

Е. С. Коняев^{1,2}, П. Г. Дядьков^{1,2}*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: e.koniaev@g.nsu.ru

Аннотация. Тектономагнитный мониторинг чаще всего проводится в районах расположения тел с аномальными значениями магнитных свойств (магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности), поскольку они являются индикаторами изменения напряженного состояния земной коры. Однако при проведении модульных измерений возникают вторичные эффекты геомагнитных вариаций, амплитуда которых превышает ожидаемый магнитоупругий эффект. Была предложена методика определения коэффициентов линейной зависимости величины вторичных эффектов геомагнитных вариаций от компонент этих вариаций. Применен метод сингулярного разложения для выявления оптимальных периодов вариаций для расчета коэффициентов. После исключения вторичных эффектов из результатов наблюдений на пунктах Заречье-1 и Сухая-2 удалось снизить среднеквадратическое отклонение разностных значений модуля вектора магнитной индукции между данными пунктами и базовой станцией Энхалук в 4 раза.

Ключевые слова: геомагнитные вариации, тектономагнитный мониторинг, модульные измерения, индуктивные и ориентационные эффекты, Зареченская магнитная аномалия, оз. Байкал

Inductive and orientational effects of geomagnetic variations in the southwest of the Zarechenskaya magnetic anomaly (eastern coast of lake Baikal)

E. S. Konyaev^{1,2}, P. G. Dyadkov^{1,2}*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
*e-mail: e.koniaev@g.nsu.ru

Annotation. Tectonomagnetic monitoring is most often carried out in areas where bodies with anomalous values of magnetic properties (magnetic susceptibility and remanent magnetization) are located, since they are indicators of changes in the stress state of the Earth's crust. However, when performing modular measurements, secondary effects of geomagnetic variations arise, the amplitude of which exceeds the expected magnetoelastic effect. A method was proposed for determining the coefficients of the linear dependence of the magnitude of the secondary effects of geomagnetic variations on the components of these variations. The singular value decomposition method was applied to identify the optimal periods of variations for calculating the coefficients. After excluding secondary effects from the results of observations at the stations Zarechye-1 and Sukhaya-2, it was possible to reduce the root-mean-square deviation of the difference values of the modulus of the magnetic induction vector between these points and the Enkhaluk base station by 4 times.

Keywords: geomagnetic variations, tectonomagnetic monitoring, module measurements, inductive and orientational effects, Zarechenskaya magnetic anomaly, Baikal Lake

Введение

Тектономагнитный мониторинг является одним из способов наблюдения за изменениями напряжений в земной коре. Актуальность данного направления исследований объясняется возможностью обнаружения процессов подготовки сильных землетрясений.

Одна из основных целей тектономагнитных наблюдений – зафиксировать магнитоупругий эффект. Он заключается в изменении магнитных свойств горных пород под действием приложенных к ним механических напряжений.

$$C = \frac{1}{\kappa_0} \frac{\partial \kappa}{\partial \sigma}, \quad (1)$$

где C - магнитоупругий коэффициент; κ_0 - начальная магнитная восприимчивость; $\partial \kappa / \partial \sigma$ – изменение магнитной восприимчивости при изменении одноосного напряжения параллельно оси их приложения [1].

Поскольку коэффициент C прямо пропорционально зависит от величины магнитной восприимчивости, то из этого следует, что породы с высокими значениями последней будут более чувствительны к изменениям напряженного состояния. Поэтому наиболее эффективно проводить наблюдения в районах интенсивных магнитных аномалий [2].

При проведении тектономагнитных наблюдений широко применяются протонные магнитометры. Они позволяют быстро и очень точно измерять модуль полного вектора магнитной индукции. Однако при модульных измерениях в аномальных полях возникают вторичные эффекты геомагнитных вариаций. Данные эффекты можно разделить на два типа. Эффекты первого типа – индуктивные. Они возникают из-за подмагничивания горных пород с приходом геомагнитной вариации. Эффекты второго типа – ориентационные. В различных пунктах наблюдений векторы магнитной индукции разнонаправлены. С приходом идентичной геомагнитной вариации модули вектора магнитной индукции будут изменяться на различную величину [3].

Данные эффекты могут быть представлены в виде линейной зависимости от компонент геомагнитной вариации:

$$\Delta \Delta T = k_x \delta X + k_y \delta Y + k_z \delta Z, \quad (2)$$

где $\Delta \Delta T$ – суммарный вторичный эффект (индуктивный и ориентационный); δX , δY , δZ – компоненты геомагнитной вариации; k_x , k_y , k_z – коэффициенты линейной зависимости вторичных эффектов геомагнитной вариации от компонент этой вариации. Данное приближение справедливо для магнитных аномалий интенсивностью до 5000 нТл [4].

Амплитуда данных эффектов зачастую превышает амплитуду ожидаемого магнитоупругого эффекта, которая обычно составляет первые нТл. Все это указывает на необходимость выявления и удаления данных эффектов из результатов высокоточных тектономагнитных наблюдений.

Методы и материалы

При высокоточных магнитных наблюдениях, направленных на поиск мало-амплитудных аномалий, к которым относятся и тектономагнитные аномалии, заметное влияние на результаты оказывают вариации геомагнитного поля от внешних источников. Основным источником данных вариаций является слой Е магнитосферы Земли, находящийся на высоте 100-120 км.

Для исключения вариаций данного типа используется метод синхронных разностей. Поскольку источник вариаций находится на достаточном удалении, то в пределах первых десятков километров на поверхности Земли вариации магнитного поля, обусловленные этим источником, можно считать идентичными. Модуль вектора магнитной индукции записывается синхронно в пункте наблюдения и на базовой вариационной станции. Далее получаем разность, из которой исключены вариации, обусловленные внешними источниками:

$$\Delta T = T_i - T_b, \quad (3)$$

где ΔT – синхронная разность модулей вектора магнитной индукции; T_i – модуль вектора индукции в пункте наблюдения; T_b – модуль вектора индукции на базовой станции.

На побережье озера Байкал находится сеть стационарных и рядовых пунктов тектономагнитных наблюдений. Эксперимент был проведен с 27 по 30 июля 2021 года на Энхалукском участке, в районе Зареченской магнитной аномалии (Рис. 1). С интервалом в 1 минуту были записаны значения модуля вектора магнитной индукции для пунктов Заречье-1 и Сухая-2 синхронно с базовой станцией Энхалук. Также на базовой станции были записаны три компоненты вектора магнитной индукции. На пунктах измерения были выполнены протонным магнитометром МВ-08, на базовой станции - магнитометром МК-07.

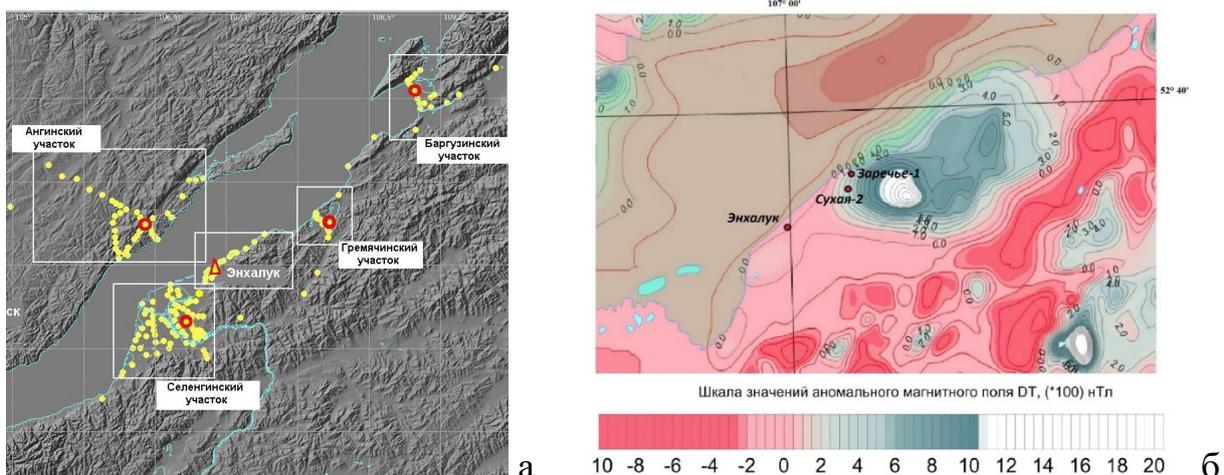


Рис.1. а - Сеть стационарных и рядовых пунктов тектономагнитных наблюдений на побережье озера Байкал; б - Зареченская магнитная аномалия на карте аномального магнитного поля по данным аэромагнитной съемки

После проведения эксперимента получили синхронную разность модулей векторов магнитной индукции для пунктов Заречье-1 и Сухая-2. После исключения из наблюдений вариаций поля от внешних источников, в разности остались вторичные эффекты геомагнитных вариаций, амплитуда которых достигала 2 нТл на суточном интервале.

Чтобы найти коэффициенты линейной зависимости вторичных эффектов геомагнитных вариаций, необходимо решить переопределенную систему из i линейных уравнений вида:

$$\Delta T_i = k_x \delta X_i + k_y \delta Y_i + k_z \delta Z_i, \quad (4)$$

где ΔT_i – изменение разности модулей индукции магнитного поля в пункте наблюдения с базовой станцией; $\delta X_i, \delta Y_i, \delta Z_i$ – изменение компонент геомагнитной вариации; k_x, k_y, k_z – искомые коэффициенты. [2]

Для определения оптимальных периодов геомагнитных вариаций для определения коэффициентов используется метод сингулярного разложения матрицы A системы уравнений:

$$A = USV^T, \quad (5)$$

где U и V^T – матрицы левых и правых сингулярных векторов; S – диагональная матрица, состоящая из сингулярных чисел.

Отношение максимального сингулярного числа к минимальному называется числом обусловленности системы. Чем больше число обусловленности системы уравнений, тем сильнее погрешности в условии будут влиять на получаемое решение. Поэтому, для поиска наиболее устойчивых решений следует выбирать данные с наименьшими числами обусловленности.

Для решения этой задачи на языке программирования Python была разработана программа. На входе программа получает изменения во времени синхронной разности модулей полного вектора магнитной индукции и трех компонент вектора магнитной индукции. Также задается ширина окна в минутах. Этим окном программа проходит по всем данным и рассчитывает для каждого интервала число обусловленности системы и коэффициенты линейной зависимости вторичных эффектов.

Результаты

После определения оптимальных периодов геомагнитных вариаций были получены следующие коэффициенты. (табл. 1)

После расчета коэффициентов были введены поправки за вторичные эффекты (Рис.2)

Удалось уменьшить среднеквадратическое отклонение разности модулей для пункта Заречье-1 с 0,312 до 0,082 нТл, для пункта Сухая-2 с 0,259 до 0,073 нТл.

Таблица 1

Коэффициенты линейной зависимости вторичных эффектов геомагнитной вариации для пунктов Заречье-1 и Сухая-2

| Пункт наблюдения | Коэффициенты | | |
|------------------|--------------|--------|--------|
| | k_x | k_y | k_z |
| Заречье-1 | -0,0072 | 0,0161 | 0,0248 |
| Сухая-2 | 0,0027 | 0,0153 | 0,0069 |

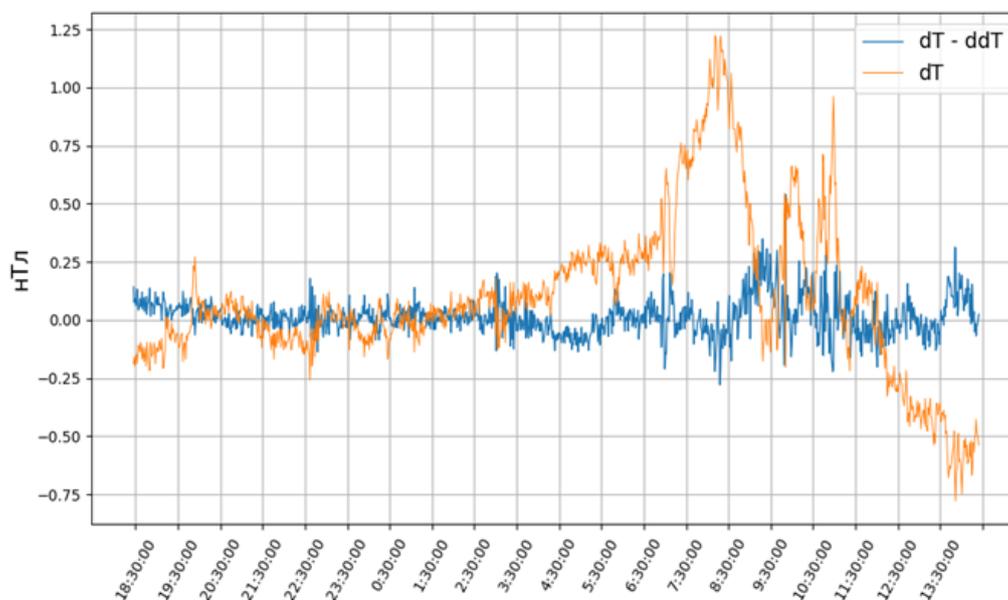


Рис. 2. Изменение разности модуля магнитной индукции до (желтый) и после (синий) введения поправки за вторичные эффекты.

Обсуждение

В результате расчета коэффициентов линейной зависимости вторичных эффектов от геомагнитной вариации, удалось достичь уменьшение среднеквадратического отклонения разности модулей в 4 раза. Это означает, что погрешность измерений удалось уменьшить до уровня, близкого к уровню аппаратной погрешности ($\sim 0,05$ нТл). Теперь, вводя поправки за вторичные эффекты для пунктов Заречье-1 и Сухая-2, можно с высокой степенью достоверности выявлять магнитоупругие эффекты.

Заключение

Были определены коэффициенты линейной зависимости k_x k_y k_z величины вторичного эффекта геомагнитных вариаций при модульных измерениях для пунктов Заречье-1 и Сухая-2. На языке программирования Python была разработана программа, позволяющая определять оптимальные периоды геомагнитных вариаций для расчета коэффициентов. В дальнейшем планируется исследовать возможность уменьшения периода регистрации геомагнитных вариаций для определения коэффициентов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке темы ПФНИ FWZZ-2022-0019.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капица С.П. Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях // Изв.АН СССР, сер. Геофиз. – 1955. – № 6. – С. 489-504.
2. Фотиади Э. Э., Каратаев Г. И., Ларионов В. А., Черемисин В.Г. К изучению пьезомагнитного эффекта реакции магнитовозмущающих тел на изменения напряжений в земной коре // Докл. АН СССР. – 1969. - Т.187 - № 6. - С. 1282–1284.
3. Дядьков П.Г., Мандельбаум М.М., Татьков Г.И. и др. Особенности развития сейсмо-тектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в Центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // Геология и геофизика. – 1999. –Т. 40 – № 3. – С. 346-359.
4. Дядьков П.Г. О линейности вторичных эффектов геомагнитных вариаций в аномальных полях при модульных измерениях // Геология и геофизика. –1985. –№ 4. – С. 129-136.

© Е. С. Коняев, П. Г. Дядьков, 2022