

УДК 550.3; 550.4

## **МАГНИТОВАРИАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»**

***С.А. Рябова***

Представлен анализ магнитовариационных параметров для среднеширотных условий Восточно-Европейской платформы. Анализ выполнен с привлечением данных инструментальных наблюдений, выполненных на Геофизических обсерваториях "Михнево" ИДГ РАН и "Борок" ИФЗ РАН в период 2010–2013 гг. Установлены периодичности вариаций магнитного типпера и магнитного тензора в приземном слое атмосферы. Определена зависимость между уровнем подземных вод в безнапорном горизонте и вариациями магнитного типпера.

## Введение

Электромагнитное поле Земли характеризуется широким спектром вариаций геомагнитного и геоэлектрического полей с периодами от тысячных долей секунды до годовых и более. Вариации полей содержат информацию об электропроводности геологической среды, внутриземных и ионосферных (магнитосферных) электрических и магнитных источниках. Более детально изучены высокочастотные вариации электромагнитного поля Земли [Колесник и др., 2009]. В меньшей степени исследованы длиннопериодные вариации, в частности, крайне ограничены сведения о годовых вариациях геоэлектрического поля, что можно объяснить отсутствием достаточно длинных рядов наблюдений [Краев, 1965; Дещеревский, Сидорин, 1999]. Данные о годовых вариациях геомагнитного поля представлены в работах [Serson, 1973; Яновский, 1978; Паркинсон, 1986; Glasmeier, 2009].

Изучение вариаций приземного электромагнитного поля представляет весьма значительный интерес. Это связано с тем, что передаточные магнитовариационные параметры электромагнитного поля содержат информацию о геодинамических процессах. В частности, магнитовариационные параметры востребованы не только при изучении геоэлектрического строения земной коры и верхней мантии, но также привлекаются при мониторинге сейсмотектонических процессов в литосфере, установлении эффектов, сопровождающих землетрясения. Например, установлено, что Южно-Байкальское (Култуклинское) землетрясение сопровождается аномальными изменениями в поведении вектора индукции [Мороз и др., 2006; Мороз, Мороз, 2012]. Исследование магнитовариационных параметров также актуально при изучении геодинамических процессов в земной коре и отдельных массивов горных пород не только в зонах повышенной сейсмической активности и разломных зонах, но и в зонах особо ответственных объектов с целью диагностики изменений напряженного состояния среды и гидрогеологического режима территории [Мороз, Мороз, 2012].

Цель настоящей работы заключается в изучении закономерностей изменения магнитовариационных параметров во времени, а также их вариации при изменении гидродинамического режима подземных вод.

## Используемые данные

В качестве исходных данных при анализе использовались результаты синхронных наблюдений за геомагнитными вариациями и режимом подземных вод на среднеширотной Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН (54,96°N; 37,77°E) и геомагнитными вариациями на геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН (58,03°N, 38,97°E), полученными за период 2010–2013 гг.

Геофизическая обсерватория "Михнево" (ГФО МНУ) расположена в 85 км к югу от города Москвы, на юге Московской области (неподалеку от города Серпухов). Местоположение обсерватории характеризуется удаленностью от крупных промышленных объектов, что делает ее особо пригодной для изучения динамики магнитовариационных параметров. Расположенная в окрестности ГФО МНУ глубинная тектоническая структура в виде Нелидово-Рязанской шовной зоны может рассматриваться как фактор, способствующий усилению эффектов,

связанных с влиянием геофизических и гидродинамических условий на вариацию магнитовариационных характеристик.

Обсерватория "Борок" (ГО ВОХ) расположена в поселке Борок Некоузского района Ярославской области. Обсерватория характеризуется идеальными условиями для проведения электромагнитных измерений – низкий уровень электромагнитных помех, отсутствие промышленных загрязнений. Расстояние между ГФО МНУ и ГО ВОХ составляет примерно 270 км.

Регистрация на ГФО МНУ локальных геомагнитных вариаций выполнялась с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018, который обеспечивает соответствующее преобразование данных, получаемых с феррозондового датчика, их обработку и накопление (регистрировались компоненты  $B_x$  и  $B_y$  по географическим осям в направлениях соответственно восток–запад и север–юг, а также вертикальная компонента  $B_z$ , направленная вдоль действия силы тяжести).

Измерения геомагнитного поля на ГО ВОХ выполняются с помощью трехкомпонентного магнитометра (производство GEOMAG) с диапазоном измерений  $\pm 70000$  нТл и полосой пропускания 0–1 Гц. В качестве регистратора используется система сбора данных ENO II (производство GEOMAG), частота дискретизации выходного сигнала составляет 1 минуту.

Измерения вариаций уровня подземных вод выполняются с использованием стандартных электроуровнемеров и прецизионных датчиков уровня LMP308i (производство Германия) с дискретностью 1 с и точностью измерений 0,1 мм. В качестве исходных данных были рассмотрены ряды среднесуточных значений уровня верхнего безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к лопасненской толще каширских отложений [Горбунова, 2006].

### Методы оценки магнитовариационных передаточных функций

При проведении оценок учитывалось, что теоретически допускается существование линейного соотношения между вертикальной составляющей геомагнитного поля  $B_z$  с горизонтальными составляющими геомагнитного поля  $B_x$  и  $B_y$  в виде (например, [Schmucker, 1970]):

$$B_z = \begin{bmatrix} T_x & T_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $T_x$  и  $T_y$ , – комплексные компоненты магнитного типпера (индукционной матрицы).

Весьма информативным параметром, который также анализируется в настоящей работе, являются индукционные стрелки, которые определяются по компонентам индукционной матрицы следующим образом:

$$\operatorname{Re} \vec{T} = \operatorname{Re} T_x \vec{i} + \operatorname{Re} T_y \vec{j}, \quad (2)$$

$$\operatorname{Im} \vec{T} = \operatorname{Im} T_x \vec{i} + \operatorname{Im} T_y \vec{j}. \quad (3)$$

Магнитуда магнитного типпера определяется из соотношения:

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}.$$

Помимо компонент магнитного типпера в настоящей работе анализируется магнитный тензор, оценка которого основана на существовании связи между горизонтальными векторами геомагнитного поля в двух точках земной поверхности в виде [Бердичевский, Жданов, 1981]:

$$\begin{bmatrix} \hat{B}_x \\ \hat{B}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{yx} \\ m_{yx} & m_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}$$

где  $m_{xx}$ ,  $m_{xy}$ ,  $m_{yx}$ ,  $m_{yy}$  – комплексные компоненты магнитного тензора.

В связи с тем, что прямая оценка магнитовариационных параметров на основе кросс-корреляционных методов часто приводит к неверным результатам (в частности, наличие шумов в исходных данных приводит к тому, что значения оцененных таким методом магнитовариационных параметров часто завышены), в настоящей работе использовался метод Ларсена [Larsen et al., 1996], который позволяет подавлять шумы различных типов: 1) некоррелированные шумы (аппаратурные, включая их дрейфы из-за влияния температуры), 2) коррелированные шумы (такие как помехи от электрифицированных железных дорог, промышленные помехи), 3) сигналы с высокой пространственной частотой (например, близкие молнии), 4) низкий уровень сигнала в "мёртвых" диапазонах.

В основе метода Ларсена лежит представление сглаженных магнитотеллурических функций в виде

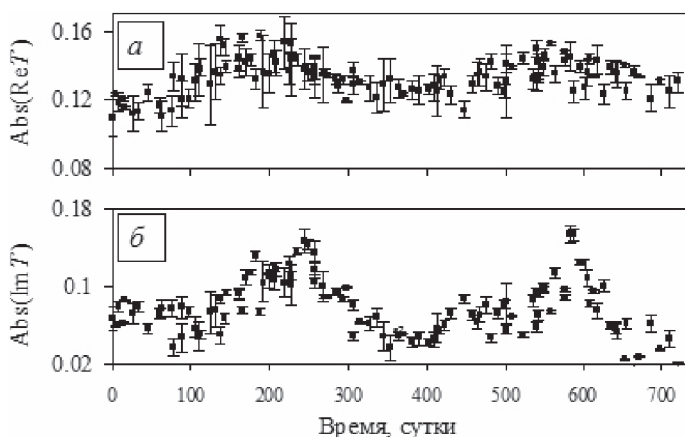
$$Z(\omega) = U(\omega)D(\omega)Z^{1-D}(\omega),$$

где  $Z^{1-D}(\omega)$  – передаточная функция для одномерной (1-D) модели,  $D(\omega)$  – безразмерная гладкая функция искажений (ее применение, как продемонстрировано в статье [Larsen et al., 1975], приводит к более точной оценке передаточных функций),  $U(\omega)$  – безразмерная гладкая корректирующая функция,  $\omega$  – частота. При расчете магнитного типпера, который представляется в виде  $T(\omega) = U(\omega)D(\omega)$ , передаточная функция  $Z^{1-D}(\omega)$  приблизительно равна единице.

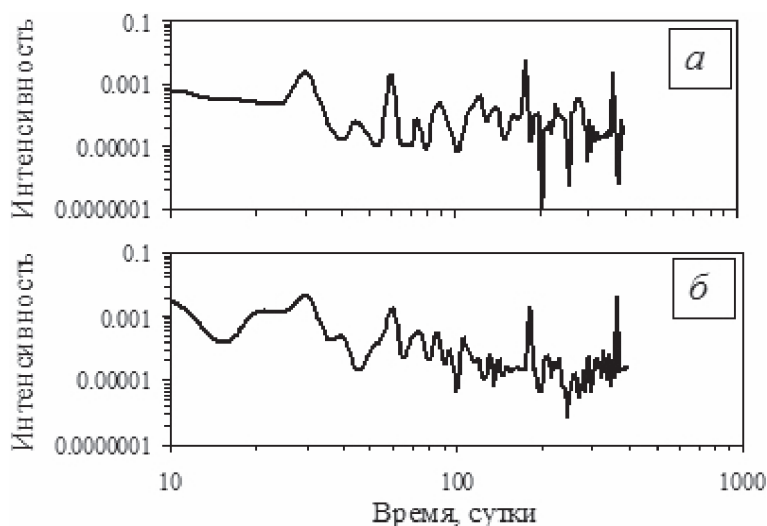
## Результаты анализа магнитовариационных параметров

Вариация магнитного типпера. Вариации магнитного типпера исследовались по данным наблюдений изменений геомагнитного поля на ГФО МНВ за период 2010–2013 гг. Анализ показал, что магнитные типперы определяются устойчиво на временном интервале не менее 5 суток. При этом когерентность между вертикальной и горизонтальными составляющими должна быть не менее 0,8.

В качестве примера на рис. 1 представлены временные ряды вещественных и мнимых частей магнитного типпера для ГФО МНВ за период 2010–2012 гг. Данные рис. 1 свидетельствуют о наличии периодичностей во временных вариациях магнитного типпера. Наиболее ярко проявляются годовые вариации в поведении модулей индукционных стрелок, что подтверждается спектральной оценкой, результаты которой в виде периодограммы приведены на рис. 2. Согласно результатам работы [Мороз и др., 2011] годовые вариации модулей мнимых индукционных стрелок характеризуют вариации электропроводности проводящего слоя,



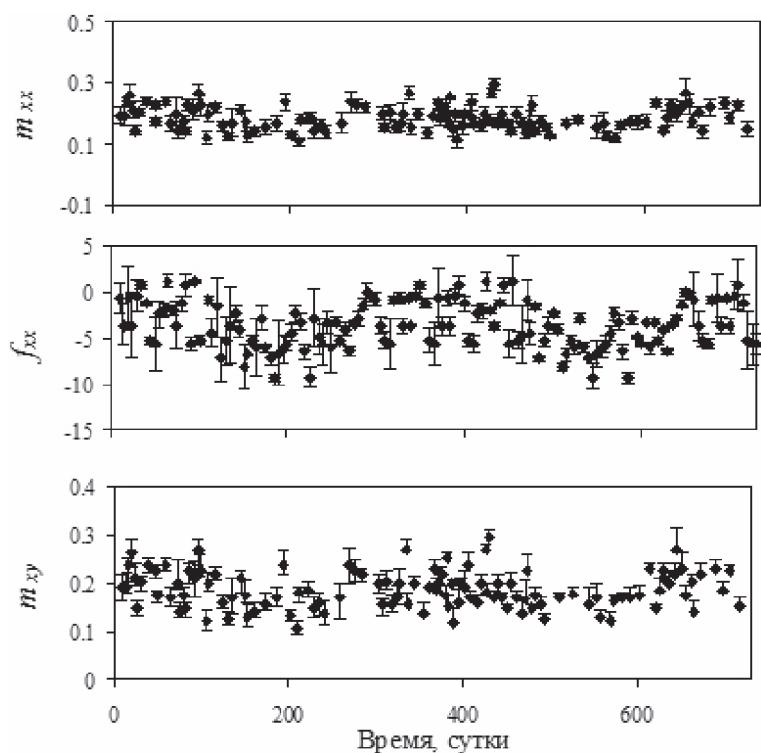
**Рис. 1.** Вариации вещественной (*a*) и мнимой (*б*) компонент магнитного типпера на ГФО МНУ за период 2010–2012 гг.



**Рис. 2.** Периодограммы вещественной (*a*) и мнимой (*б*) компонент магнитного типпера на ГФО МНУ за период 2010–2013 гг.

в котором концентрируются электрические токи, вызванные индукцией. Это позволяет предполагать, что выделенная в настоящей работе годовая периодичность связана с наличием мощного проводящего слоя. Представленные на рис. 2 периодограммы свидетельствует, что кроме годовой периодичности наблюдаются хорошо выраженные периодичности магнитного типпера с периодами 0,5 года и 60 сут. Годовая и полугодовая периодичности носят сезонный характер. Источник периодичности с 60-ти суточным периодом в настоящее время не ясен и требует проведения дополнительных исследований.

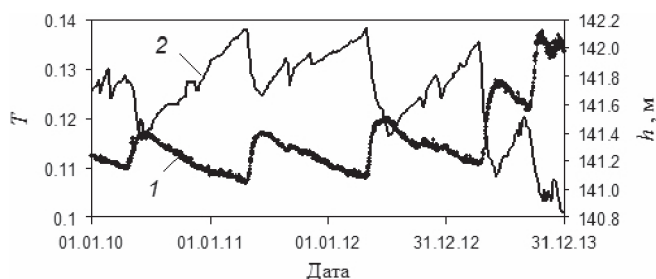
Вариации магнитного тензора. Характеристики магнитного тензора определялись с использованием результатов наблюдений вариаций геомагнитного поля,



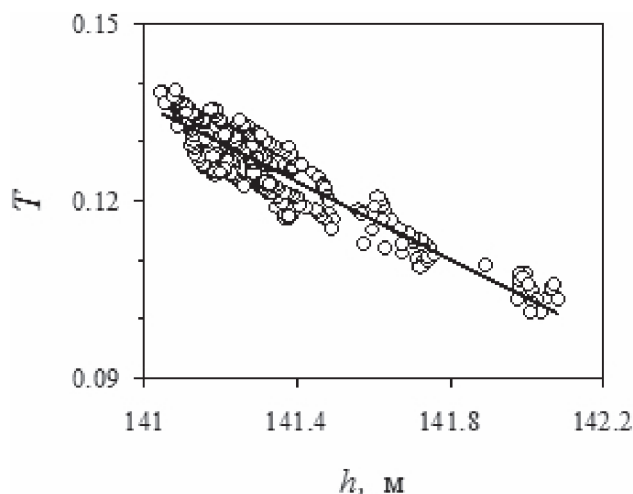
**Рис. 3.** Вариации модуля ( $m_{xx}$ ) и фазы ( $f_{xx}$ ) основной компоненты и модуля дополнительной компоненты ( $m_{xy}$ ) магнитного тензора на ГФО МНВ за период 2010–2012 гг.

полученные в геофизических обсерваториях «Михнево» и «Борок». Анализ показал, что компоненты магнитного тензора определяются устойчиво на временном интервале равном 5 суткам. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчета компонент магнитного тензора. Более детальный анализ свидетельствует о том, что вариации основных компонент и их фаз характеризуются меньшей дисперсией по сравнению с дополнительными компонентами и их фазами. Характерно, что в поведении компонент магнитного тензора выражены годовые вариации, которые по амплитуде в целом превышают дисперсию в 3–5 раз и более четко проявляются в вариациях фаз основных компонент, что, как уже упоминалось, с большой вероятностью связано с изменением электропроводности земной коры. Здесь следует отметить, что поскольку изменение электропроводности земной коры определяется процессами, протекающими в твердых оболочках Земли, выделенные годовые вариации магнитовариационных параметров на примере магнитного типпера и магнитного тензора могут быть использованы для характеристики геодинамических процессов в земной коре, которые характеризуются периодичностями, близкими к 1 году, например, связанными с вращением Земли вокруг Солнца.

Совместные вариации магнитного типпера и уровня подземных вод. На рис. 4 представлены результаты оценки магнитуды магнитного типпера и абсолютного



**Рис. 4.** Вариации уровня безнапорного водонасыщенного горизонта (1) и магнитуды магнитного типпера (2) на ГФО МНВ за период 2010–2013 гг.



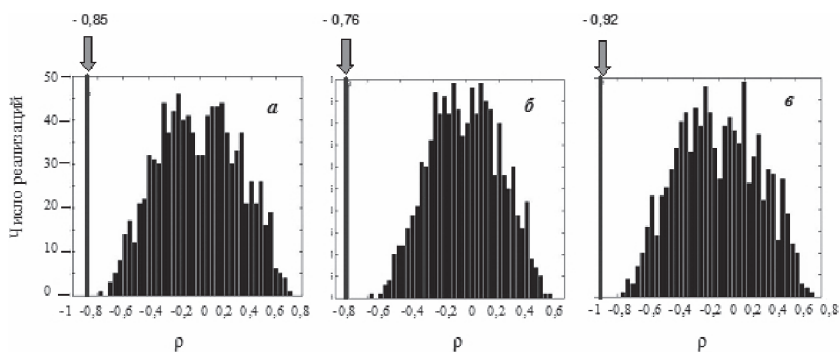
**Рис. 5.** Зависимость между магнитудой магнитного типпера  $T$  и уровня подземных вод  $h$  на ГФО МНВ за период 2010–2013 гг.

уровня подземных вод безнапорного горизонта, которые демонстрируют синхронность их изменений.

Зависимость между вариациями магнитного типпера  $T$  и уровня подземных вод  $h$  в открытой скважине приведена на рис. 5. Данные рис. 5 свидетельствуют о практически линейной связи между  $T$  и  $h$ . С достаточной для оценок точностью зависимость  $T(h)$  представима в виде:

$$T(h) = -0,0327h + 4,74004.$$

Подтверждение и проверка достоверности статистической значимости соотношения (1) между амплитудами  $T$  и  $h$  выполнялись на основе метода суррогатных рядов данных. В настоящей работе при анализе корреляционных соотношений использовались подходы Кенделла, Спирмена и Пирсона, коэффициент корреляции вычислялся как для оригинальных, так и для суррогатных рядов. Результаты вычисления коэффициентов корреляции приведены на рис. 6 в виде гистограмм (по оси ординат приведено количество реализаций с данным коэффициентом корреляции). Коэффициенты корреляции, вычисленные для оригинальных ря-



**Рис. 6.** Гистограммы, демонстрирующие корреляцию суррогатных рядов данных с использованием разных подходов: а) Кендалла; б) Спирмена; в) Пирсона. Вертикальными стрелками и линиями обозначены значения коэффициентов корреляции (соответствующие цифры приведены в поле рисунка) для исходных рядов данных

дов данных, представлены для перечисленных выше подходов в поле рисунков. Так как значения коэффициентов корреляции исходных рядов не попали в интервалы значений, соответствующих построенным случайным гистограммам, можно утверждать, что существует корреляционная зависимость между вариациями  $T$  и  $h$ . В нашем случае значения коэффициентов детерминации  $R^2$  являются относительно высокими (Кендалла – 58%, Пирсона – 85%, Спирмена – 72%), что позволяет утверждать, что рассматриваемые процессы характеризуются значимой корреляцией между  $T$  и  $h$ .

## Выводы

По данным наблюдений вариаций геомагнитного поля, полученным в ГФО «Михнево» и ГО «Борок» проанализированы магнитный типпер и магнитный тензор. В их поведении выявлены годовые вариации. В магнитном тензоре годовые вариации в большей мере проявились в поведении фаз основных компонент. Для обеих обсерваторий наряду с годовой периодичностью наблюдаются вариации магнитного типпера с полугодовой периодичностью и периодом 60 сут. Для условий ГФО МНУ, где выполняются гидрогеологические наблюдения, установлена линейная зависимость между амплитудой магнитного типпера  $T$  и уровнем подземных вод  $h$  в открытой скважине.

## Литература

- Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра, 1981. 327 с.
- Горбунова Э.М. Основные закономерности изменения режима подземных вод Приокского участка Нелидово-Рязанской шовной зоны // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2006. С. 219–227.
- Децерековский А.В., Сидорин А.Я. Скрытые периодичности и фликкер-шум в электротеллурическом поле // Физика Земли. 1999. № 4. С. 56–67.
- Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В. Электромагнитная экология. Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. 336 с.
- Краев А.П. Основы геоэлектрики. М.: Недра, 1965. 588 с.



Мороз Ю.Ф., Мандельбаум М.М., Мороз Т.А. Поиск аномальных эффектов в геофизических полях в связи с землетрясениями в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 2006. № 5. С. 83–96.

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. 2012. № 5. С. 64–76.

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Смирнов С.Э. Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля на обсерваториях «Магадан» и «Паратунка» // Физика Земли. 2011. № 8. С. 49–61.

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 528 с.

Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 578 с.

Glasmeyer K.-H., Soffel H., Negendank J.F.W. Geomagnetic field variations. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 425 p.

Larsen J.C. Low frequency (0.1–6.0 cpd) electromagnetic study of deep mantle electrical conductivity beneath the Hawaiian Islands // Geophys. J. R. astr. SOC. 1975. № 43. P. 17–46.

Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophysical Journal International. 1996. Vol. 124. P. 801–819.

Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the South Western United States / Berkley Los Angeles–London: Univ. California Press. 1970. 165 p.

Serson P.H. Instrumentation for induction studies on land // Phys. Earth and Planet. Inter. 1973. № 7. P. 313–322.