

УДК 550.385.3,550.343

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-87-90

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ВЕКТОРОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

© 2016 г. И.Л. Трофимов, Х.Д. Канониди

Трофимов Игорь Леонтьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, г. Москва, 123242, e-mail: trofimov@igemi.troitsk.ru

Trofimov Igor Leont'evich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya, 10, Moscow, 123242, e-mail: trofimov@igemi.troitsk.ru

Канониди Харлампий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором магнитно-ионосферных взаимодействий, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калужское шоссе, 4, г. Троицк, г. Москва, 142190, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Kanonidi Kharlampii Dmitrievich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Head of Sector of Magnetic-Ionospheric Interactions, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaluzhskoe Highway, 4, Troitsk, Moscow, 142190, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

В рамках круга идей методологии data mining предложено использовать осреднённые по длинным временным рядам геомагнитных вариаций параметры регрессионной модели, связывающей вертикальную и горизонтальные составляющие вектора вариаций. Новизной подхода является описание регрессии в виде четырёх параметров комплексного вектора, соответствующего коэффициентам регрессии. Приведены в виде графиков результаты расчётов для семи обсерваторий мировой сети.

**Ключевые слова:** комплексный вектор, магнитная обсерватория, геомагнитные вариации, временные ряды.

Averaged along long-term temporal rows of geomagnetic variations, parameters of the regression model, which connects vertical and horizontal components of the vector of variations, were suggested to utilize in frames of «data mining» methodology ideas. The novelty of the approach is the description of the regression as four parameters of a complex vector corresponding to regression coefficients. The computational results are presented for seven observatories of the world-wide net.

**Keywords:** complete vector, magnetic observatory, geomagnetic variation, times row.

В настоящее время в мировых центрах данных собран обширный материал наблюдений вариаций геомагнитного поля в электронном виде. Он непрерывно пополняется и находится в свободном доступе в Интернете. В распоряжении научного сообщества имеется вычислительная техника, доступная практически каждому исследователю, что даёт возможность изучать большие массивы данных с точки зрения их внутреннего устройства на основе некоторой модели. В связи с этим появилось много различных вычислительных алгоритмов, получивших за рубежом обобщённое название data mining. Применение на практике таких алгоритмов позволяет уточнить результаты эпохи ручных вычислений и обосновывать новые научные задачи. В связи с этим мы предлагаем ввести в практику изучения геомагнитных вариаций модель модулированной квазигармоники, описываемой в терминах параметров комплексного вектора.

Многолетняя практика изучения морфологии геомагнитных вариаций позволяет утверждать, что весь частотно-временной диапазон регулярных вариаций может быть представлен для каждого морфологического типа временной зависимостью, описываемой формулой

$$f(t) = a(t) \cdot \cos \omega t + b(t) \cdot \sin \omega t = A(t) \cdot \cos[\omega t + \phi(t)]. \quad (1)$$

Частота в (1) может считаться известной, так как существующая классификация типов вариаций построена на разделении их по частоте  $f(t) = 2\pi/T$ , где  $T$  – период вариации. Коэффициенты  $a(t)$ ,  $b(t)$  описывают огибающую вариации. Фактически в самом общем смысле исследование пространственно-временных зависимостей в различных задачах геомагнетизма связано с анализом огибающих в (1). Во многих случаях определяемые при этом параметры зависят от поляризации вариаций, которая может меняться во времени и пространстве. Мы предлагаем ал-

горитм описания вариаций, связанный с их поляризацией.

В основе алгоритма лежит математическое определение комплексного вектора. В [1–3] приводятся свойства этих векторов и их практическое применение. В [4, 5] эти результаты получили дальнейшее использование. На основе [1, 3] найдено следующее общее выражение для комплексного вектора:

$$\mathbf{A}(X, Y, Z) = X \cdot \mathbf{i} + Y \cdot \mathbf{j} + Z \cdot \mathbf{k} = \text{re}\mathbf{A} + i \cdot \text{im}\mathbf{A} = (\mathbf{a} - i \cdot \mathbf{b}) \cdot \exp(i \cdot \theta). \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } \text{re}\mathbf{A} &= \text{re}X \cdot \mathbf{i} + \text{re}Y \cdot \mathbf{j} + \text{re}Z \cdot \mathbf{k}; \\ \text{im}\mathbf{A} &= \text{im}X \cdot \mathbf{i} + \text{im}Y \cdot \mathbf{j} + \text{im}Z \cdot \mathbf{k}. \end{aligned}$$

При умножении (2) на  $\exp(i\omega t)$  получается описание гармонически изменяющегося радиус-вектора, годографом которого является эллипс – эллипс поляризации (ЭП), у которого  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$  – большая и малая полуоси;  $\theta$  – фазовый угол. Далее везде используется прямоугольная правая декартова система координат. Как принято в геофизике, ось  $x$  направлена по астрономическому (или магнитному) меридиану;  $y$  – вправо по часовой стрелке;  $z$  – внутрь Земли. Формулы (1)–(2) записаны в этой системе координат, что следует учитывать при вычислениях. Подчеркнём, что (2) можно применять для любого вектора с комплексными компонентами. На основании (2) будем рассматривать комплекснозначный вектор, компоненты которого изменяются во времени по закону (1)

$$\mathbf{F}(t) = \text{re}\mathbf{F}(t) + i \cdot \text{im}\mathbf{F}(t) = [\mathbf{a}(t) - i \cdot \mathbf{b}(t)] \cdot \exp(i\omega t). \quad (3)$$

Здесь  $\text{re}\mathbf{F}(t)$  – наблюдаемый вектор вариации;  $\text{im}\mathbf{F}(t)$  получен из него преобразованием Гильберта или просто сдвигом на четверть периода. Эта операция аналогична восстановлению квадратурной части простого гармонического сигнала. Выражение (3) описывает комплекснозначный амплитудно-модулированный вектор как последовательность мгновенных ЭП.

Мы будем изучать временные ряды (3) при помощи линейной регрессии между компонентами  $\mathbf{F}(t)$

$$\mathbf{Z}(t) = M \cdot X(t) + N \cdot Y(t). \quad (4)$$

Ниже мы покажем, что эта регрессия содержит информацию, которую сложно обнаружить, вычисляя только параметры ЭП. В работе [4] при помощи расчётов (4) был изучен геоэлектрический разрез Северного Ледовитого океана. При этом использовались гармоники солнечно-суточной вариации временных рядов длиной не более пяти суток. Цель данной работы – применение регрессии (4) для описания годовых рядов геомагнитных вариаций магнитных обсерваторий в диапазоне периодов до 27-дневного.

Коэффициенты выражения (4) вычисляются точно для двух неравных отсчётов компонент

в разные моменты времени. При этом погрешность определения  $M, N$  очень велика при современной точности измерения вариаций. Тем не менее (4) может служить теоретической основой для разработки алгоритмов и программ для вычисления  $M, N$  методом наименьших квадратов. С этой целью был создан в среде MatLab пакет программ, который вместе с обслуживающими подпрограммами позволяет вести расчёты с данными, представленными в форматах мировых центров данных с любым постоянным шагом оцифровки. Для построения рядов (3) производилась фильтрация исходных временных рядов узкополосным фильтром для заданного набора расчётных периодов. Применялись различные фильтры из стандартной библиотеки программ MatLab. Коэффициенты (4) вычислялись методом наименьших квадратов в скользящих по длине обрабатываемого ряда окнах заданной длины. Найденный для этих окон массив коэффициентов осреднялся и для среднего двумерного комплексного вектора  $\mathbf{P}(M, N)$  вычислялись большая и малая полуоси  $m, n$ ,  $\alpha$  – угол  $m$  с осью  $x$ ;  $\psi$  – фазовый угол. Применялись выражения [1–3]

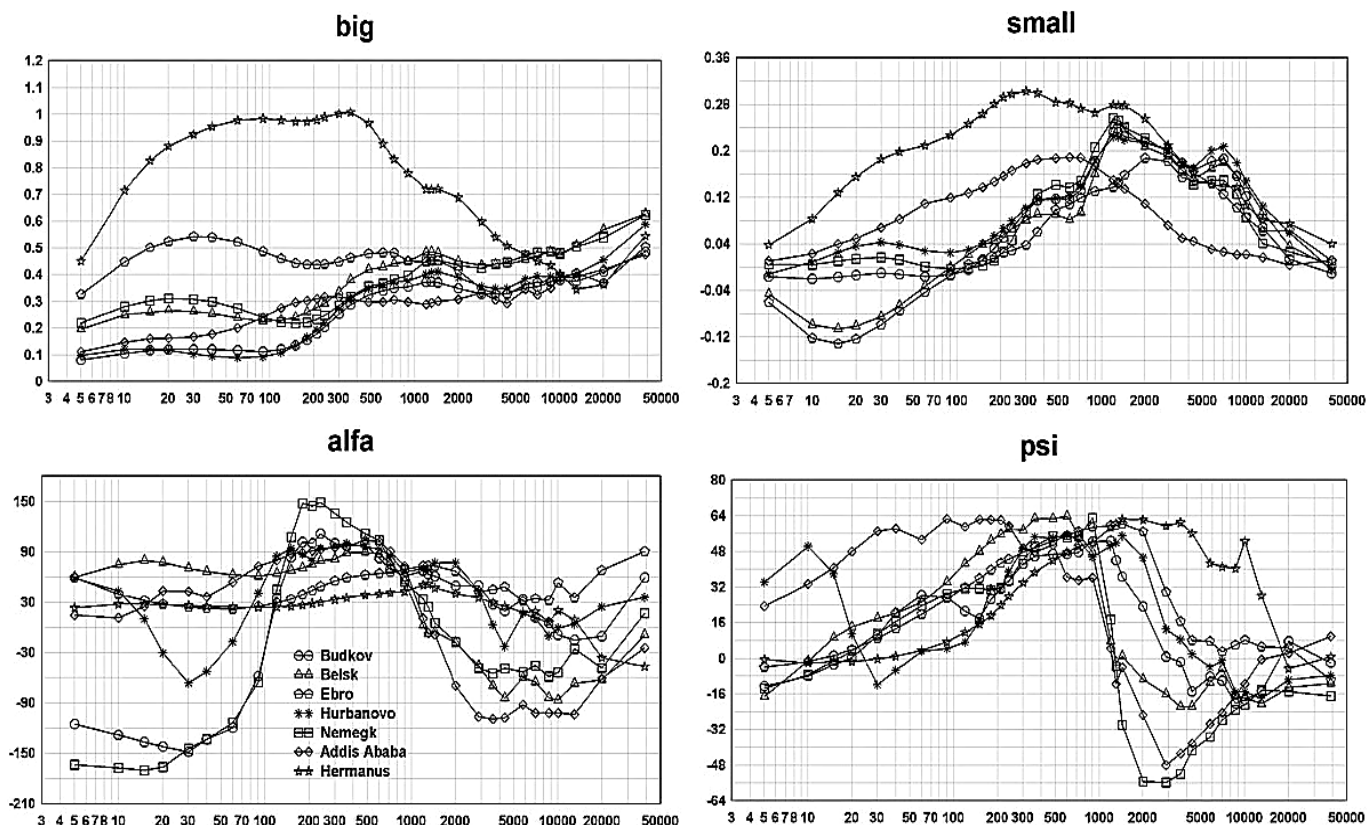
$$M + iN = (m + n) \cdot \exp(\psi + \alpha),$$

$$M - iN = (m - n) \cdot \exp(\psi - \alpha).$$

Расчёты проведены для семи обсерваторий мировой сети. Пять из них расположены в Европе, две – в Африке. В обработку были взяты данные за 2012 г. в виде массивов из 12 месячных файлов с оцифровкой одна минута. Вычисления проводились для каждого месяца и затем результаты осреднялись, т.е. конечные параметры относятся к ряду длиной в один год. На рисунке показаны графики параметров  $m(\text{big}), n(\text{small}), \alpha(\text{alfa}), \psi(\text{psi})$ . Каждая точка на графике является вычисленной величиной. Соответствующие периоды в минутах нанесены по оси абсцисс в логарифмическом масштабе в диапазоне 5–38800 (27-дневный период) минут. По оси ординат масштаб равномерный. Углы представлены в градусах, полуоси – в безразмерных величинах.

Теперь рассмотрим интерпретацию параметров. Полученные осреднением на множестве мгновенных ЭП коэффициенты  $M, N$  позволяют для любого из этих ЭП с составляющими  $X_i, Y_i$  рассчитать некоторое «характерное» среднее значение вертикальной составляющей  $Z_m = M \cdot X_i + N \cdot Y_i$ . Двумерный вектор  $\mathbf{H}(X_i, Y_i)$  является проекцией трёхмерного вектора  $(X_i, Y_i, Z_i)$  на плоскость  $xy$ . Согласно [1–3],  $Z_m$  является скалярным произведением

$$Z_m = (\mathbf{P}, \mathbf{H}) = m \cdot a \cdot [(1 - n \cdot b / m \cdot a) \cdot \cos \theta + i \cdot (n / m - b / a) \cdot \sin \theta] \cdot \exp(\phi + \psi).$$

Графики параметров  $m(big)$ ,  $n(small)$ ,  $\alpha(alfa)$ ,  $\psi(psi)$ 

Здесь  $a$ ,  $b$  – полуоси;  $\varphi$  – фазовый угол  $\mathbf{H}$ ;  $\theta = \beta - \alpha$ , где  $\beta$  – угол  $a$  с осью  $x$ . Из этого выражения следует, что при  $\theta = 0$  и  $n/m = -b/a$  величина  $|Z_m/a|$  достигает максимальной величины; при  $\theta = \pi/2$  и  $n/m = b/a$  имеем  $Z_m = 0$ .

При линейной поляризации  $\mathbf{H}$  полуось  $b = 0$ , и для этих же значений  $\theta$  имеем  $|Z_m/a| = m$  и  $|Z_n/a| = n$ . Эти свойства  $Z_m$  могут служить для сравнения поведения вариаций на разных обсерваториях. Так, на рисунке наблюдается сложное поведение параметров  $P$  даже на близко расположенных обсерваториях в Европе. По параметру  $big$  обсерватория Эбро существенно отличается от остальных. Наибольшие значения  $big$  наблюдаются для обсерватории Германус. Скорее всего, это связано с влиянием океана. По параметру  $small$  явно выделяются обсерватории Германус и Аддис-Абеба. Более подробный анализ требует учёта геологических структур в районе обсерваторий, что не являлось целью данной работы. Подводя итог вышеизложенному, можно заключить, что содержание проделанной нами работы обнаруживает перспективность предложенного

метода исследования временных рядов на обсерваториях мировой сети. Заметим, что описание поляризации вариаций с помощью модели модулированной гармонике обладает преимуществом наглядности и простоты программной реализации по сравнению с методикой спектрально-корреляционного анализа.

#### Литература

1. Трофимов И.Л., Шнеер В.С. Опыт определения индукционных векторов по наблюдениям с дрейфующего льда в Северном Ледовитом океане // Тезисы Второй Всерос. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли. М., 2005. С. 105–106.
2. Трофимов И.Л., Шнеер В.С. Некоторые результаты определения магнитного индукционного вектора в Центральной Арктике // Геофизические исследования. 2007. № 8. С. 69–74.
3. Трофимов И.Л., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., Орехова Д.А., Попова И.В., Шнеер В.С., Щорс Ю.Г. Некоторые черты строения центральной части Северного Ледовитого океана по результатам моделирования магнитовариационных данных с учётом эквивалентного источника // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 3. С. 50–70.

4. Wanliss J.A., Shiokawa K., Yumoto K. Latitudinal variation of stochastic properties of the geomagnetic field // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. Vol. 21. P. 347–356.
5. Hall C.M. Complexity signatures in the geomagnetic H component recorded by the Tromso magnetometer (70 N, 19 E) over the last quarter of a century // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. Vol. 21. P. 1051–1058.

#### References

1. Trofimov I.L., Shneer V.S. [Experience the definition of induction vectors according to the observations from drifting ice in the Arctic Ocean]. *Tezisy II Vseros. shkoly-seminara po elektromagnitnym zondirovaniyam Zemli* [Abstracts of II All-Russian school-seminar on electromagnetic sounding of the Earth]. Moscow, 2005, pp. 105-106.
2. Trofimov I.L., Shneer V.S. Nekotorye rezultaty opredeleniya magnitnogo induktsionnogo vektora v Tsentral'noi Arktike [Some results of the determination of

- the magnetic induction vector in the Central Arctic]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2007, no 8, pp. 69-74.
3. Trofimov I.L., Zhdanov M.S., Korotaev S.M., Kruglyakov M.S., Orekhova D.A., Popova I.V., Shneer V.S., Shchors Yu.G. Nekotorye cherty stroeniya tsentral'noi chasti Severnogo Ledovitogo okeana po rezultatam modelirovaniya magnitovariatsionnykh dannykh s uchedom ekvivalentnogo istochnika [Some features of the central part of the Arctic Ocean as a result of the structure of simulation magnetovariational data taking into account the equivalent source]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2014, vol. 15, no 3, pp. 50-70.
4. Wanliss J.A., Shiokawa K., Yumoto K. Latitudinal variation of stochastic properties of the geomagnetic field. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2014, vol. 21, pp. 347-356.
5. Hall C.M. Complexity signatures in the geomagnetic H component recorded by the Tromso magnetometer (70 N, 19 E) over the last quarter of a century. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2014, vol. 21, pp. 1051-1058.