

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПОДМАГНИЧИВАНИЯ ЛИТОСФЕРЫ  
ЗАПАДНОГО УРАЛА ВЕКОВОЙ ВАРИАЦИЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В  
2000–2009 гг.**

*Федорова Н.В., Криковцева Т.Г.* – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

**Аннотация.** Проведено моделирование эффектов подмагничивания литосферы Западного Урала вековой вариацией геомагнитного поля в 2000–2009 гг. В этот период фокус векового хода в Евразии располагался над Уралом. Рост индукции геомагнитного поля по данным обсерватории Арти составил 373 нТл. В результате моделирования построены карты составляющих векового хода, вызванные увеличением индуцированной намагниченности пород литосферы. Интенсивность аномального поля могла увеличиться на 10 нТл.

*Геомагнитное поле, вековая вариация, вековой ход, моделирование, обсерватория Арти.*

**MODELING THE EFFECTS OF INDUCED MAGNETIZATION OF THE LITHOSPHERE  
OF THE WESTERN URALS BY GEOMAGNETIC SECULAR VARIATION OVER  
THE NINE-YEAR PERIOD OF 2000–2009**

*Fedorova N.V., Krikovtseva T.G.* – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

**Abstract.** Modeling the effects of induced magnetization of the lithosphere of the Western Urals by secular variation of the geomagnetic field in 2000–2009 has been carried out. During this period the focus of the secular variation in Eurasia located on the Urals. Growth induction of the geomagnetic field according to Arty observatory was 373 nT. According to the results of the simulation maps of components of the secular variation caused by the increase in the induced magnetization of rocks of the lithosphere have been constructed. The intensity of the anomalous field could increase by 10 nT.

*Geomagnetic field, secular variation, secular trend, modeling, Arty observatory.*

**Введение**

Вековые вариации геомагнитного поля в основном связаны с источниками, лежащими внутри земного шара, и вызываются теми же причинами, что и магнитное поле Земли (Яновский, 1978). Локальные аномалии векового хода могут быть созданы изменением намагниченности литосферных пород вследствие пьезомагнитного или индукционного эффектов.

Ряд крупных региональных магнитных аномалий Западного Урала – Манчажская, Кунгурская, Михайловская, Шамарская – расположены в Предуральском краевом прогибе. Интенсивность аномального магнитного поля достигает 1000–1500 нТл.

Геофизическая обсерватория Арти находится в пределах Манчажской магнитной аномалии, на расстоянии 25 км к востоку от её эпицентра. В 1968–1974 гг. в пределах Манчажской региональной магнитной аномалии зарегистрирован ано-

мальный вековой ход модуля магнитной индукции (Булашевич, Шапиро, 1975).

В результате синхронных наблюдений 1973–1978 гг. в пределах эпицентральной зоны аномалии выделена протяженная область размерами 40x10 км, где магнитное поле увеличивалось в течение всего времени наблюдений (Шапиро, 1982). Так как при магнитовариационных исследованиях эффект подмагничивания не был обнаружен, то предполагалось, что аномалия векового хода имеет тектономагнитную природу и отражает динамику современных процессов в литосфере.

При дальнейших полевых наблюдениях геомагнитных вариаций (суббурия в октябре 1977 г. и солнечно-суточные в 1998 г.) были зарегистрированы аномальные эффекты в различных пунктах наблюдений в пределах Манчажской аномалии (Федорова, Максимовских, 2000).

В результате моделирования эффектов подмагничивания пород земной коры гео-

магнитными вариациями показано, что такие аномальные вариации можно полностью объяснить только индуктивной намагниченностью источника аномалии (Федорова, 2005а).

В конце 20 века на Урале наблюдался значительный рост геомагнитного поля. Фокус векового хода в Евразии располагался непосредственно над Уралом. По данным обсерватории Арти максимальное значение векового хода 53 нТл/год было зарегистрировано в 2002–2003 гг. Поскольку данные обсерватории используются для изучения геомагнитного поля Земли, то важно оценить какой вклад в измерения в обсерватории вносят эффекты, вызванные ростом намагниченности литосферы из-за вариаций главного магнитного поля Земли.

С 2007 г. сотрудники обсерватории Арти возобновили работы по изучению геомагнитного поля в окрестностях обсерватории с целью детального изучения его вековых изменений, которые могут быть вызваны геолого-геофизическими процессами и сейсмичностью района (Кусонский, 2008). В 2009 г. наблюдения были проведены на 17 пунктах (Бибнев, 2011). На ряде пунктов выявлены различия в значениях векового хода по сравнению с данными в Арти. Так в пункте Токари, расположенном почти в эпицентре Манчажской аномалии, в 2008 и 2009 гг. значения векового хода составили 37 и 42 нТл/год, а в Арти 36 и 42 нТл/год соответственно. В пункте Бардым рост поля составил 33 и 40 нТл/год. Поскольку все пункты находятся в пределах Манчажской аномалии, то для того чтобы выделить аномальные эффекты, вызванные современными процессами в земной коре, нужно в первую очередь оценить и исключить из данных наблюдений эффекты, созданные изменением намагниченности литосферы.

В представленной работе проведено моделирование индукционного эффекта подмагничивания вековой вариацией литосферных пород источников региональных магнитных аномалии Западного Урала в период 2000–2009 гг.

### *Моделирование источников региональных аномалий*

Исзуемая территория (56–58° с.ш. и 55–60° в.д.) имеет достаточно большие размеры, более чем 200x300 км. При моделировании геофизических полей от крупных объектов без учета формы Земли возникают погрешности, достигающие существенных величин и имеющие сложные закономерности (Старостенко, Манукян, Заворотько, 1986), поэтому моделирование выполнено для сферической формы Земли.

Для аппроксимации магнитного поля Манчажской, Кунгурской, Михайловской и Шамарской аномалий использовалась модель трехмерных источников, представляющая собой набор из 281 сферических параллелепипедов, полученная в результате итерационного процесса подбора аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  (Федорова, 2005б). Каждый элементарный параллелепипед задается следующими параметрами: географические координаты долготы и широты нижнего левого угла  $\lambda_1$ ,  $\varphi_1$  и  $\lambda_2$ ,  $\varphi_2$  – верхнего правого;  $h_1$  и  $h_2$  – глубины до верхней и нижней кромок объекта, вектор намагниченности  $I = I(I_x, I_y, I_z)$ . В пределах источника намагниченность считается однородной. Горизонтальные размеры сферических параллелепипедов для района Манчажской региональной магнитной аномалии задавались 5'x5'. Нижняя кромка была задана на глубине 35 км. Значения магнитного поля рассчитывались по сетке 10'x10'.

Для определения компонент вектора магнитной индукции модели источников региональных аномалий использованы формулы, приведенные в работе (Старостенко, Манукян, Заворотько, 1986). Расчет составляющих магнитного поля от сферического параллелепипеда проводился с помощью численное интегрирование по объему источника. Итоговое поле модели получено суммированием полей от элементарных сферических параллелепипедов. Была исследована применимость нескольких численных методов, в основе которых лежат квадратурные формулы Гаусса-Лежандра (Крылов, Шульгина, 1966). В результате вычислительных тестирований хорошо за-

рекомендовал себя метод с использованием кубатурных формул с равноотстоящими узлами (Криковцева, 2012). Так же при вычислениях применялись кубатурных процессы, описанные в работе (Старостенко, Манукян, Заворотько, 1986).

Алгоритм вычисления прямой задачи для сферических параллелепипедов реализован в виде программного модуля на языке С# и работает на платформе .NET.

На вход подается файл, содержащий параметры источников, компоненты намагничивающего поля, начальная точка наблюдения ( $\lambda_0, \varphi_0$ ) и шаг по долготе  $\lambda$  и широте  $\varphi$  для равномерной сетки наблюдений. Выходные данные представлены в виде таблицы, содержащей координаты точки и вычисленные значения компонент вектора индукции магнитного поля.

Геометрия источников задавалась моделью, описанной выше. Величина и на-

правление намагниченности  $I$  определялись земным магнитным полем и изменялись вслед за ним (индуцированная намагниченность  $I = \chi H$ ). Магнитная восприимчивость  $\chi = 0,06$  ед. СИ. Параметры намагничивающего поля  $H$  задавались по данным среднегодовых значений главного геомагнитного поля в обсерватории Арти.

Для представленной модели источников региональных магнитных аномалий были рассчитаны годовые эффекты подмагничивания пород литосферы вековой вариацией геомагнитного поля для периода 2000–2009 гг.

#### Анализ результатов моделирования

По результатам моделирования для изучаемой территории Западного Урала были построены карты модуля индукции  $\Delta T_a$  и прямоугольных составляющих  $X_a, Y_a, Z_a$  магнитного поля источников (рис. 1).

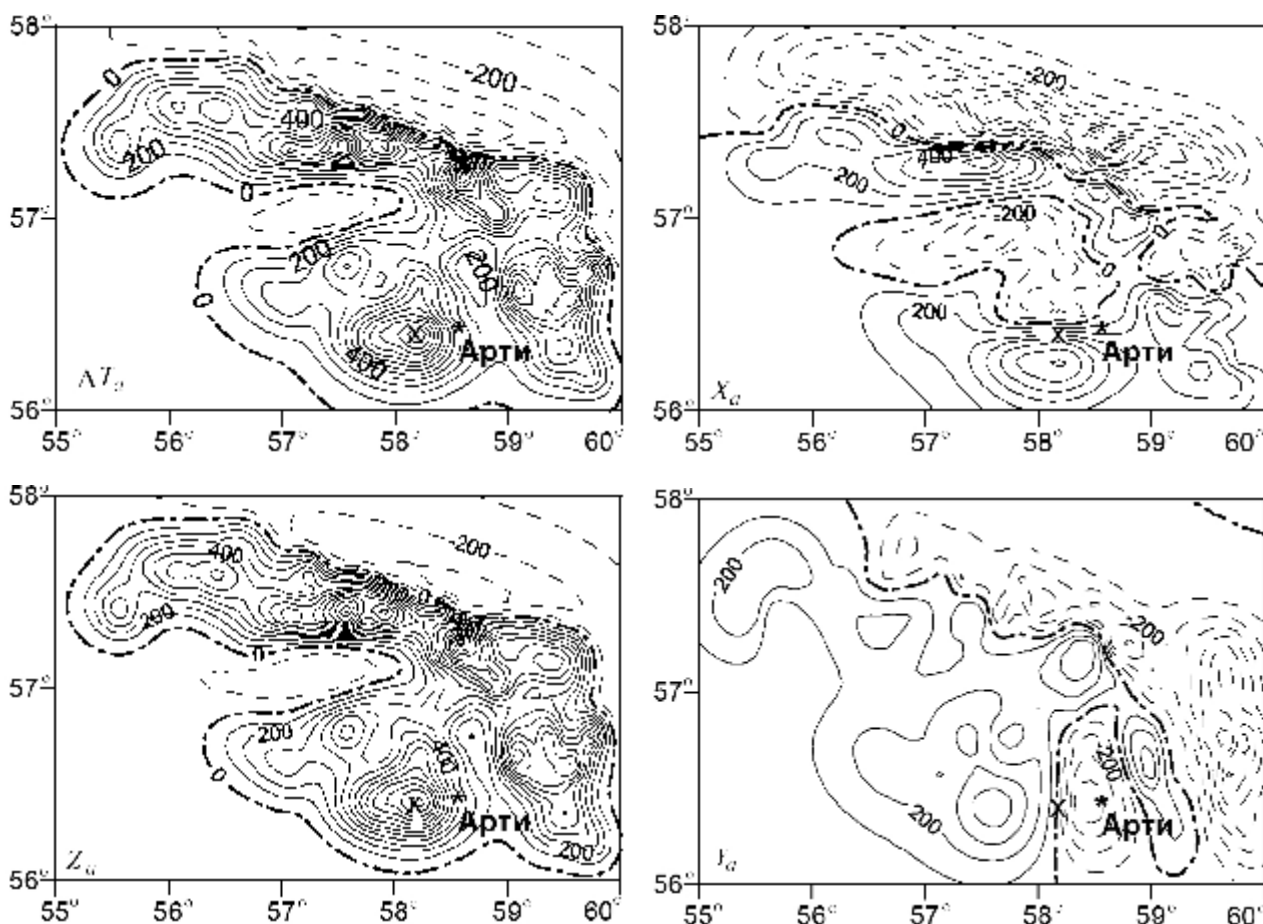
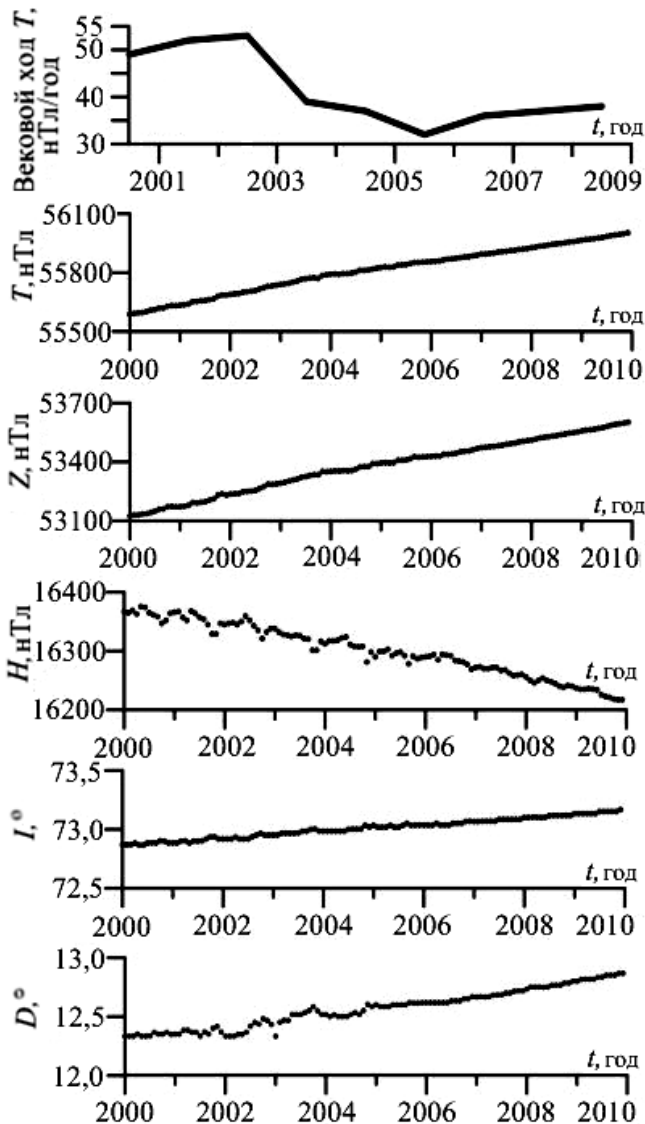


Рис. 1. Карты аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  (нТл) модели и составляющие  $X_a, Y_a, Z_a$  (нТл). Крестиком отмечен эпицентр аномалии  $\Delta T_a$

Геофизическая обсерватория Арти расположена на расстоянии ~25 км к востоку от её эпицентра Манчажской аномалии  $\Delta T_a$ ,



**Рис. 2.** Вековые изменения компонент геомагнитного поля в обсерватории Арти в период 2000–2009 гг.

примерно на таком же расстоянии от максимума вертикальной компоненты  $Z_a$  и в районе экстремума восточной компоненты  $Y_a$ .

На каждый год  $t$  периода 2000–2009 гг. для модели источников региональных аномалий рассчитаны значения вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{T}(t) = \mathbf{T}_N(t) + \mathbf{T}_a(t)$ , где  $\mathbf{T}_N(t)$  – главное геомагнитное поле и  $\mathbf{T}_a(t)$  – поле региональных аномалий. Затем были построены ежегодные карты разности моду-

лей вектора  $d\mathbf{T} = \mathbf{T}(t_1) - \mathbf{T}(t_2)$ , что позволило оценить годовые значения вариационных эффектов модуля индукции, созданные подмагничиванием пород земной коры вековой вариацией геомагнитного поля. Расчеты  $d\mathbf{T}$  проведены для 9-летнего интервала 2000–2009 гг. Изменения компонент геомагнитного поля в обсерватории Арти в период 2000–2009 гг. показаны на рис. 2.

На рис. 3. приведены результаты моделирования индукционных эффектов подмагничивания пород литосферы Западного Урала вариациями геомагнитного поля за периоды: а) 2002–2003 гг.; б) 2005–2006 гг.; в) 2000–2009 гг.

В 2002–2003 гг. изменение модуля  $T$  составило  $dT_N = 53$  нТл, что соответствует максимальному вековому ходу для периода 2000–2009 гг. Изменения наклоения  $I$  и склонения  $D$  составляли:  $dI = 3'$ ,  $dD = 7'5''$ . Прирост поля по результатам моделирования составил в обсерватории Арти 0,1 нТл, в эпицентре Манчажской аномалии 1,2 нТл; в эпицентральных зонах Шамарской и Кунгурской аномалий более – 1,5 нТл.

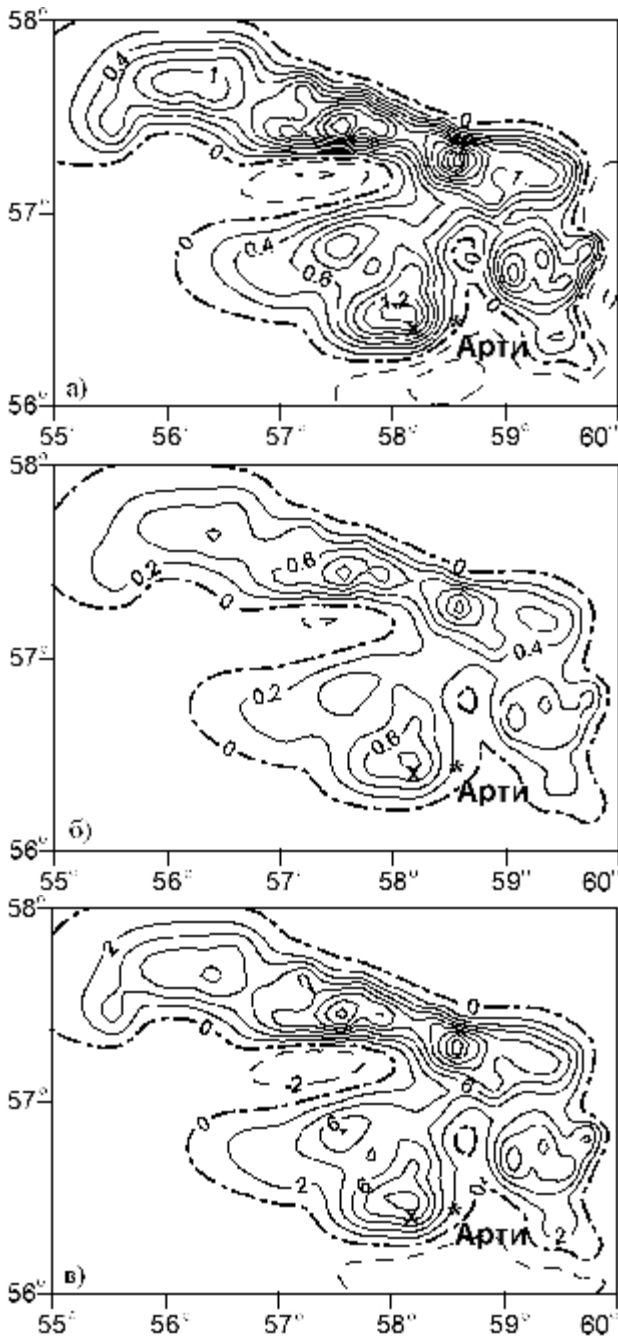
В 2005–2006 гг. модуль  $T$  увеличился на 32 нТл, что соответствует минимальному вековому ходу для интервала 2000–2009 гг., при этом очень незначительно изменились угловые составляющие на  $dI = 1'1''$  и  $dD = 2'2''$ . Прирост поля по результатам моделирования составил в обсерватории Арти 0,1 нТл, в эпицентральной зоне Манчажской аномалии 0,9 нТл.

За весь период 2000–2009 гг. изменение геомагнитного поля составило:  $dT_N = 373$  нТл,  $dI = 15'57''$ ,  $dD = 29'4''$ .

В Арти в результате роста намагниченности литосферы эффект подмагничивания в вековой ход  $T$  не превысил 1 нТл/год. Увеличения интенсивности аномального поля в Арти составило 2 нТл, а в эпицентрах региональных аномалий для Манчажской и Михайловской – 5 нТл, для Кунгурской и Шамарской – 10 нТл.

#### **Сопоставление результатов моделирования и измерений на пунктах векового хода**

В начале статьи мы упомянули, что с



**Рис. 3.** Результаты моделирования индукционных эффектов подмагничивания пород литосферы Западного Урала вариациями геомагнитного поля за периоды: а) 2002–2003 гг.; б) 2005–2006 гг.; в) 2000–2009 гг.

2007 г. сотрудники обсерватории Арти возобновили работы по изучению векового хода геомагнитного поля в окрестностях обсерватории (Бибнев, 2011). На ряде пунктов выявлены различия в значениях векового хода по сравнению с данными в Арти в пределах 3 нТл/год. В пункте Токари, расположенном рядом с эпицентром

Манчажской аномалии, в 2008 и 2009 гг. значения векового хода составили 37 и 42 нТл/год, а в Арти – 36 и 42 нТл/год, соответственно.

Измеренное различие между этими пунктами в 2008 г. составляет 1 нТл/год, что практически точно соответствует результатам проведенного моделирования.

Здесь следует отметить, что сеансы измерений на пунктах векового хода проводятся достаточно непродолжительное время и только один раз в год. И поэтому полученные значения измеренных годовых разностей модуля индукции дают представления о вековом ходе с погрешностью не более, чем  $\pm 2$  нТл/год. Это связано с тем обстоятельством, что изменения геомагнитного поля в течение суток даже при спокойных солнечно-суточных вариациях могут превосходить годовые вариации. Поэтому эффект подмагничивания литосферы, вызванный солнечно-суточными вариациями, для территории Манчажской аномалии может в течение дня меняться от  $-2$  до  $+2$  нТл.

Результаты моделирования таких эффектов показаны в работе (Кормильцев и др., 1995) и подтверждены синхронными измерениями в пунктах Усть-Бугалыш и Арти (Федорова, Максимовских, 2000). В течение суток наблюдений в этих пунктах вариация восточной компоненты  $Y$  составила от  $+10$  до  $-50$  нТл, а измеренный эффект от  $+1$  до  $-2$  нТл.

Поэтому, для того чтобы сопоставлять результаты измерений на пунктах векового хода и моделирования необходимо при вычислениях эффекта подмагничивания литосферы задавать значения намагничивающего поля в моменты измерений.

### **Выводы**

По результатам моделирования вариационных эффектов созданных подмагничиванием литосферы вековой вариацией геомагнитного поля в 2000–2009 гг. на территории Западного Урала годовые значения изменений модуля  $T$  не превышали 2 нТл/год, а в эпицентре Манчажской аномалии они не превышали 1,2 нТл/год.

За девятилетний интервал 2000–2009 гг.

значительные вековые изменения модуля  $T$  и угловых составляющих геомагнитного поля могли вызвать увеличение интенсивности в эпицентрах Манчажской и Михайловской аномалий  $\sim 5$  и  $\sim 10$  нТл – в эпицентрах Кунгурской и Шамарской аномалий.

Вековой ход, регистрируемый в обсерватории Арти, в основном отражает изменения магнитного поля планетарного характера. Увеличение намагниченности литосферы могли вызвать вариации векового хода модуля индукции от 0,1 до 0,3 нТл/год. За девятилетний период 2000–2009 гг. в обсерватории изменения модуля  $T$  составили 373 нТл, а величина составляющей от увеличения намагниченности литосферы оценивается только в 2 нТл.

Авторы выражают свою благодарность О.А. Кусонскому за предоставление результатов измерений геомагнитного поля в обсерватории Арти.

#### **Литература**

*Бибнев А.С.* Результаты наблюдения геомагнитного поля на пунктах векового хода в окрестностях обсерватории Арти // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: Шестые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 32–34.

*Булашевич Ю.П., Шапиро В.А.* Аномальность векового хода геомагнитного поля в обсерватории Арти // Геомагнетизм и аэрномия. 1975. Т. 15. № 2. С. 382–383.

*Кормильцев В.В., Костров Н.П., Ратушняк А.Н., Шапиро В.А.* Динамика магнитного поля на объекте, подобном Манчажской магнитной аномалии на Западном Урале – Рукопись деп. в ВИНТИ 1995. № 2193-В95.

*Криковцева Т.Г.* Моделирование эффекта подмагничивания литосферных пород ве-

ковой вариацией геомагнитного поля на период 2000–2009 гг. в районе обсерватории Арти // XIII Уральская молод. науч. школа по геофизике. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. С. 108–110.

*Крылов В.И., Шульгина Л.Т.* Справочная книга по численному интегрированию. М.: Наука, 1966. 372 с.

*Кусонский О.А.* О современном состоянии обсерваторских исследований на Урале // Геофизическое исследование Урала и сопредельных регионов: Мат-лы Межд. конф., посв. 50-летию Института геофизики УрО РАН. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 123–125.

*Старостенко В.И., Манукян А.Г., Заворотько А.Н.* Методика решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии на шарообразных планетах. Киев: Наукова думка, 1986. 112 с.

*Федорова Н.В., Максимовских С.И.* Исследование магнитовариационных эффектов на Манчажской магнитной аномалии // Теория и практика геоэлектрических исследований. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 156–165.

*Федорова Н.В.* Моделирование динамики магнитного поля при исследовании природы Манчажской аномалии векового хода // Физика Земли. 2005а. № 5. С. 18–25.

*Федорова Н.В.* Исследование аномалии векового хода геомагнитного поля в обсерватории Арти и на Манчажском полигоне // Уральский геофизический вестник. 2005б. № 7. С. 61–69.

*Шапиро В.А.* Исследование временной динамики Манчажской региональной магнитной аномалии // Физика Земли. 1982. № 8. С. 65–77.

*Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 592 с.