

УДК 550.384.3

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ АНТАРКТИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБСЕРВАТОРСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ IGRF

В.Г. Бахмутов, Л.Н. Яременко, Г.В. Мельник, О.Я. Шендеровская

*Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, пр. Палладина 32, 03680 Киев  
e-mail: gmelnyk@igph.kiev.ua*

**Реферат.** Представлено карти складових головного магнітного поля для 1960, 1995 і 2000 рр та його вікових варіацій для епох 1958 і 1997,5 рр. для Антарктики, побудовані за спостереженнями на антарктичних обсерваторіях з 1958 по 2003 рр. та на модельних розрахунках магнітного поля за коефіцієнтами IGRF на ділянках, не охоплених спостереженнями. Встановлено загальне зменшення інтенсивності магнітного поля в районі Антарктики, вплив Тихоокеанського фокуса вікового ходу на узбережжі Антарктиди на довготах 240–360° сх. д. та великий градієнт вікових варіацій між деякими порівняно близько розташованими обсерваторіями.

**Magnetic field of Antarctic according to modelling calculations IGRF and supervision of observatories** by V. G. Bakhmutov, L. N. Yaremenko, G. V. Melnyk, O. Ja. Shenderovska

**Abstract.** The maps of components of the main magnetic field for 1960, 1995 and 2000 and its secular variations for epoch 1958 and 1997,5 for Antarctic, constructed on supervision on the Antarctic observatories with 1958 on 2003 and to modelling calculations of a magnetic field by IGRF coefficients are presented. The general reduction of intensity of a magnetic field in area of Antarctic, influence of Pacific focus of a century course on coast of Antarctica on longitudes 240–360° E and the big gradient of secular variations between the some rather closes located observatories is established.

**Key words:** main magnetic field, Antarctica, secular variations.

### Введение

Одной из основных задач при изучении магнитного поля Земли (МПЗ) является представление его в виде аналитической зависимости компонент напряженности от пространственных координат точек земной поверхности или околоземного пространства. Такое представление возможно, если из наблюдений известно распределение элементов земного магнетизма на поверхности Земли. Крупным шагом в аналитическом представлении земного магнитного поля явилась теория Гаусса. Она позволяет представить МПЗ как функцию координат данной точки, оставляя совершенно в стороне физические причины возникновения этого поля. Основанием теории Гаусса является предположение о том, что МПЗ вызывается источниками, которые находятся внутри земного шара и поэтому имеют потенциальный характер. Магнитный потенциал, создаваемый на поверхности шара магнитными массами, расположенными внутри него, выражается в виде двойной суммы с бесконечным числом слагаемых, причем каждое слагаемое представляет собой функцию  $P_n^m(\cos \theta) \frac{\cos m\lambda}{\sin m\lambda}$  от  $\theta$  и  $\lambda$  с постоянными коэффициентами  $g_n^m$  и  $h_n^m$  (Яновский, 1978). Этот ряд носит название сферического гармонического ряда. Составляющие напряженности поля по осям координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  находятся дифференцированием выражения для потенциала геомагнитного поля по соответствующей координате. Постоянные коэффициенты  $g_n^m$  и  $h_n^m$  рассчитываются на основании данных непосредственных наблюдений геомагнитного поля. Хотя теория Гаусса была предложена еще в 1838 г., она является основой и для современного аналитического описания геомагнитного поля.

Международная Ассоциация Геомагнетизма и Аэрономии (IAGA) ежегодно представляет версии стандартного математического описания главного магнитного поля Земли (International Geomagnetic Reference Field (IGRF)) на сайте Мирового Центра данных в Киото (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>). Коэффициенты для современной 13-й модели были определены целевой группой IAGA в декабре 2004 г. IGRF – продукт совместной работы организаций и институтов, вовлеченных в сбор и распространение спутниковых и обсерваторских данных наблюдений магнитного поля и магнитных съемок во всем мире.

Синтезированные по единым для всей Земли коэффициентам сферического гармонического анализа поля не могут отображать региональные особенности геомагнитного поля. Поэтому в последнее время многие исследователи переходят к анализу МПЗ по отдельным регионам.

Анализ изменений магнитного поля в Антарктике по данным наблюдений на отдельных обсерваториях приведен в (Яременко и др., 2000). Предварительные карты горизонтальных и вертикальной составляющих главного магнитного поля и его вековых вариаций частично представлены в работах (Яременко, и др., 2000, Третьяк и др., 2002).

Цель данной работы – анализ изменений магнитного поля в районе Антарктики с 1960 по 2000 год. В основу построения карт магнитного поля положены обсерваторские наблюдения. Однако в 1960 г. на

территории Антарктики работало 17 обсерваторий, к 2000 г. их количество уменьшилось до 12. Обсерватории неравномерно распределены по площади, и их количество явно недостаточно для уверенного проведения изолиний магнитного поля. Поэтому на пространствах, где совсем нет наблюдений, составляющие магнитного поля были рассчитаны по коэффициентам IGRF.

### Карты главного магнитного поля

Наиболее репрезентативными являются карты вертикальной составляющей магнитного поля  $Z$ , магнитного склонения  $D$ , а также полного магнитного поля  $T$ . Поэтому ниже приводятся только эти карты и краткое описание карт других составляющих. Положительные изолинии на всех картах проведены пунктиром, отрицательные – сплошной линией.

В первую очередь выделяется южный магнитный полюс, расположенный вблизи обсерватории Дюмон–д'Юрвилль DRV в океане (здесь и далее мнемонакод обсерваторий приведен в соответствии с (Jankowsky and Sucksdorff, 1966)). Величина магнитного склонения  $I$  в 1995 г. в DRV составляла  $-88,7^\circ$ . Изолиния  $-85^\circ$  захватывает площадь приблизительно  $30^\circ \times 15^\circ$ , включающую побережье Антарктиды и часть Индийского океана в направлении к Австралии. Величины с магнитным склонением  $-80^\circ$  характерны для побережья Антарктиды со стороны Австралии, включающего обсерватории Скот-Бейс SBA, Терра-Нова-Бей TNB и Кейси CSY. Магнитное склонение до  $-75^\circ$  включает почти всю восточную часть Антарктиды с обсерваториями Мирный MIR, Восток VOS и доходит почти до южного географического полюса. Далее на запад  $I$  уменьшается до  $-57,1^\circ$  на обсерватории Аргентинские острова AIA. Общее уменьшение идет в направлении Атлантического океана. Карта  $I$  во многом повторяет карту  $Z$  (рис. 1а), т.е. в данном случае изменения склонения и интенсивности магнитного поля происходят синхронно. Наибольшая отрицательная величина  $Z$  установлена в районе DRV, она равняется  $-69486$  нТл. Следует отметить, что между картами на 1995 г. и 2000 г. (рис.1б) разница незначительна. В связи с этим для других составляющих поля строилась только одна карта для 2000г. Изолинии проведены через 5000 нТл. На карте  $Z$  максимальные отрицательные величины занимают значительную часть Индийского океана и побережье Антарктиды с обсерваториями DRV и SBA. На географическом полюсе  $Z$  уменьшилось до 52000 нТл. Как и на предыдущей карте, уменьшение абсолютной величины поля  $Z$  в 2000 г. идет к Атлантическому океану.

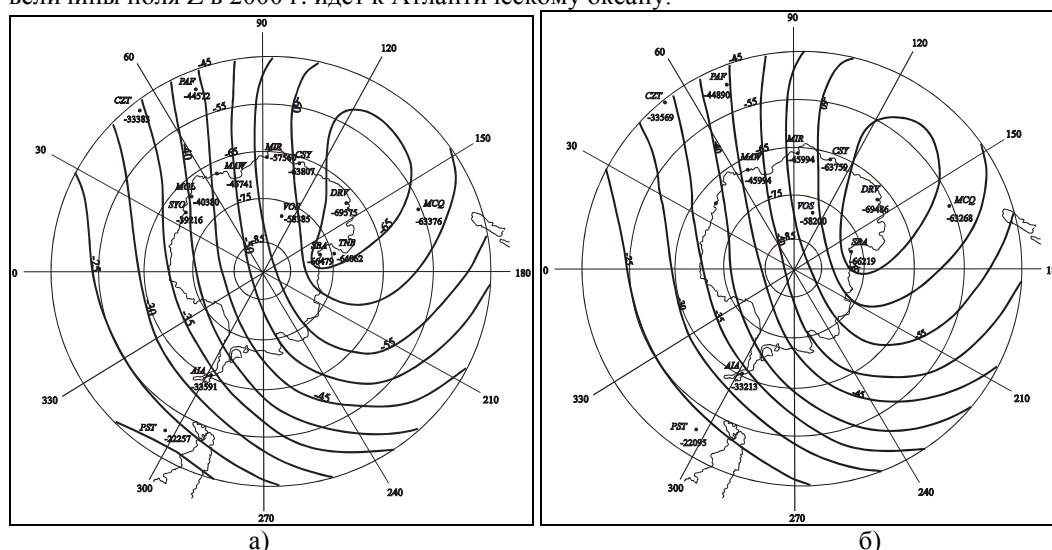


Рис. 1. Карты  $Z$ -составляющей магнитного поля Антарктики для 1995 г. (а) и 2000 г. (б). Изолинии проведены через 5 тыс. нТл, значения поля на обсерваториях – в нТл.

Довольно похожа на карту  $Z$  карта полного вектора магнитного поля  $T$  (рис. 2а, б). Максимальное значение поля в этом случае также находится вблизи DRV и равно  $-69506$  нТл. Область, окруженная изолинией  $-65$  тыс. нТл, еще больше увеличилась (по сравнению с  $Z$ ) и также включает DRV, TNB и SBA. Аналогично предыдущим картам уменьшение поля через Антарктиду идет в направлении Атлантического океана. Разница в величинах  $T$  в 1995 (рис. 2а) и 2000 г. (рис. 2б) незначительна. Поэтому, чтобы установить разницу во временном ходе в полном поле, были построены карты за 1960 г. (рис. 3а, б). На всех картах  $Z$  и  $T$  общий характер поля и его изменений сохранились, но произошло уменьшение величины поля  $Z$  и  $T$  от 1960 к 2000г на 2–4 тыс. нТл.

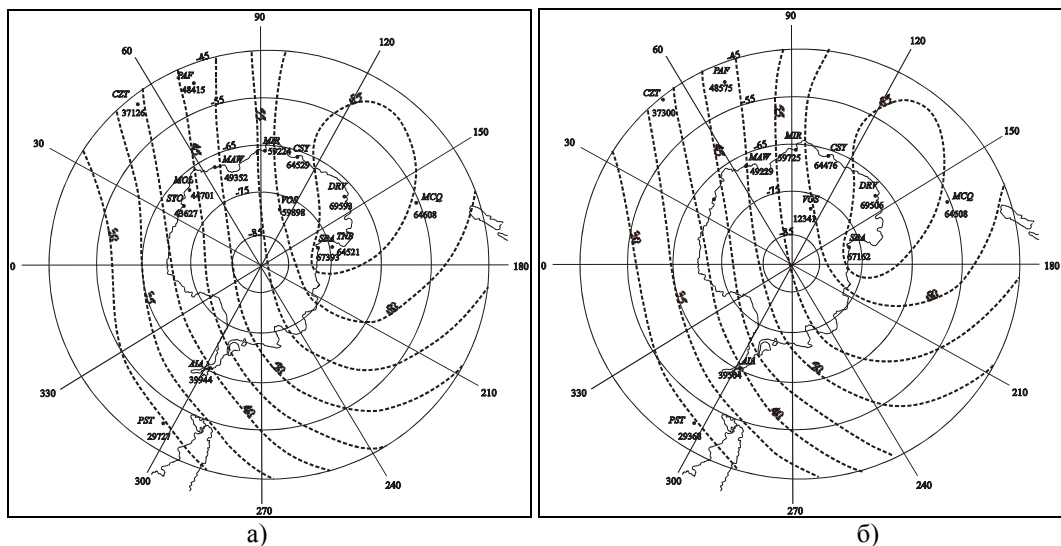


Рис. 2. Карты полного магнитного поля Т Антарктики для 1995 г. (а) и 2000 г. (б). Изолинии проведены через 5 тыс. нТл, значения поля на обсерваториях – в нТл.

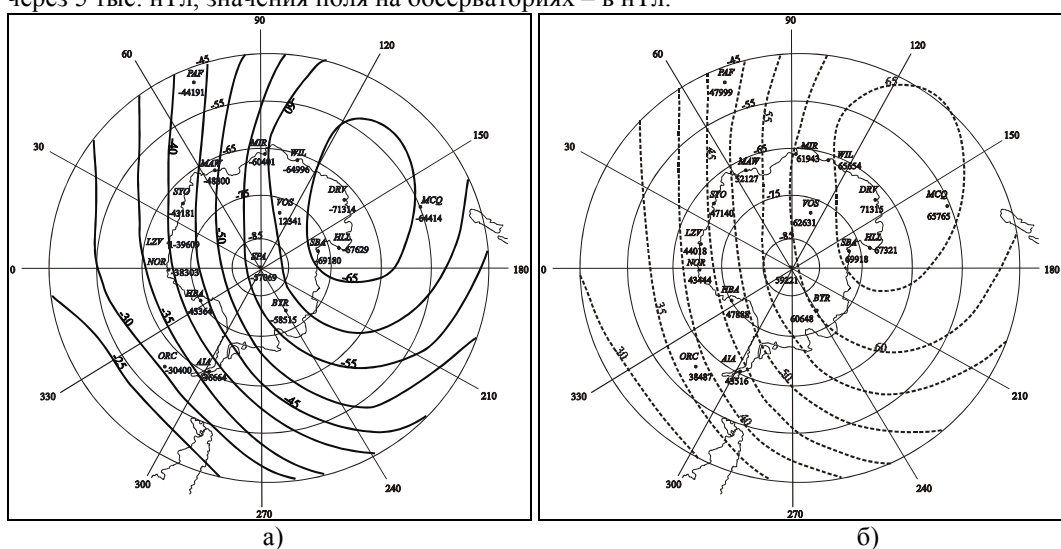


Рис. 3. Карта полного магнитного поля Z (а) и Т (б) Антарктики для 1960 г. Изолинии проведены через 5 тыс. нТл, значения поля на обсерваториях – в нТл.

Совсем иной вид имеют карты магнитного склонения D (рис. 4 а, б). Склонение представляет собой угол между географическим и геомагнитным меридианом. На географическом полюсе определяется только геомагнитный меридиан, а географический отсутствует, на геомагнитном полюсе – наоборот. Вокруг географического полюса геомагнитный меридиан сохраняет одно и то же направление, а географические меридианы меняют его от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . То же самое происходит и вокруг геомагнитного полюса, где постоянное направление характерно для географического меридиана, а переменное – для геомагнитного. Таким образом, склонение на полюсах становится неопределенным, а вокруг них может принимать значения от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Поэтому все изолинии склонения сходятся в географическом и геомагнитном полюсах. Нулевая изолиния (и ее продолжение – изолиния  $180^\circ$ ) пересекает Антарктиду приблизительно по географическим меридианам  $140^\circ$ – $150^\circ$  и  $330^\circ$ . Наиболее резко магнитное склонение меняется вблизи DRV – до  $10^\circ/\text{год}$ . Обсерватория DRV была установлена в 1957 г. почти на магнитном полюсе. С тех пор склонение резко уменьшалось на величину  $8$ – $12^\circ/\text{год}$  до 1970, далее до 1973 г. наблюдается более медленное уменьшение  $D \sim 1^\circ/\text{год}$ , после 1973 г. уменьшается со скоростью до  $4^\circ/\text{год}$ . В области между полюсами, чем ближе к изолинии  $180^\circ$ , тем резче изменение склонения. Только при удалении на  $10$ – $20^\circ$  от  $180^\circ$ -й изолинии начинается его более плавное уменьшение. Все Тихоокеанское побережье Антарктиды (включая AIA) характеризуется восточным склонением. На обсерваториях побережья Индийского и Атлантического океанов в основном наблюдается западное склонение (от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ ). В CSY поле направлено почти точно на южный магнитный полюс, который расположен немного севернее параллели CSY. Поэтому обсерватория один год дает значения  $D +86^\circ$ , на следующий год  $-93^\circ$ , а потом опять  $+86^\circ$ . Можно только предполагать, что наблюдения ведутся то по северному, то по южному концам стрелки магнитометра, что, по-видимому, связано с особенностями работы этой обсерватории.

Сопоставление карт D за 2000 г. и 1960 г. (рис. 4 а, б) показывает, что изолинии за пределами материка в 2000 г. приблизились к зоне между полюсами, чтошний раз подтверждает уменьшение магнитного поля к 2000 г.



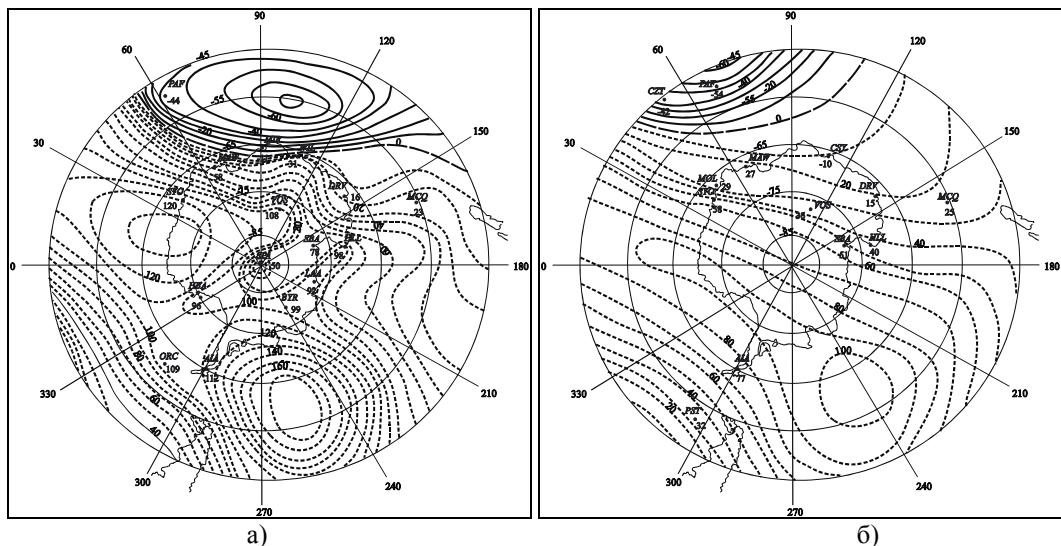


Рис. 5. Вековой ход  $Z$  в 1958г (а) и 1997,5г (б). Изолинии проведены через 10 нТл.

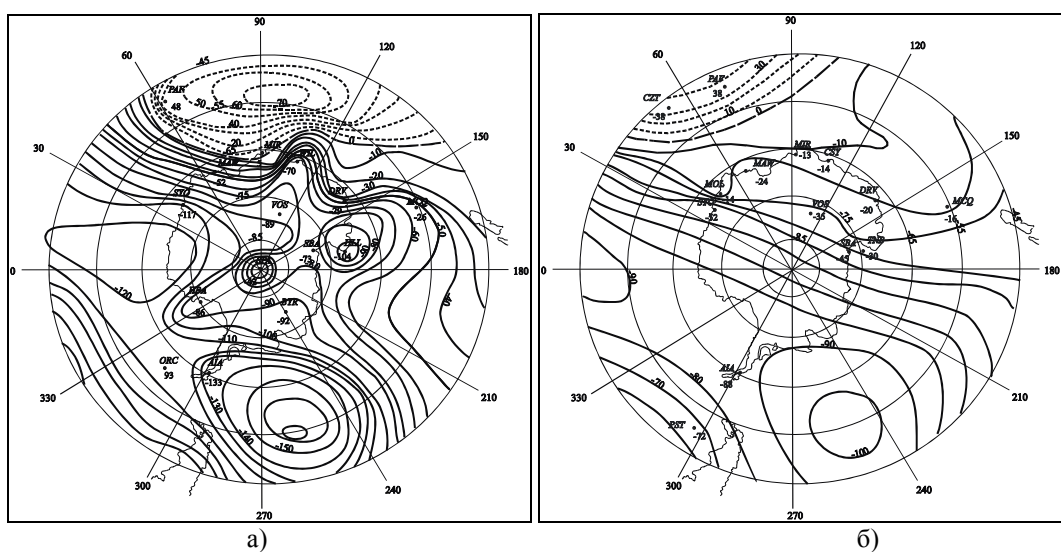


Рис. 6. Вековой ход  $T$  для 1958 г. (а) и 1997,5 г. (б). Изолинии проведены через 10 нТл.

Но далее изменения вековых вариаций становятся более плавными. Они отображают влияние фокуса (104 нТл), находящегося в Тихом океане приблизительно в районе  $60^\circ$  ю.ш.  $250^\circ$  в.д. Полоса увеличенных вековых вариаций по изолинии  $+90$  нТл протягивается далеко по побережью Антарктиды (Хали-бей НВА, Санае SNA), и неполное затухание этих больших вариаций сказывается в АИА, создавая вариации  $Z +76,7$  нТл. В Порт-Стенли PST они уменьшаются до  $+32,6$  нТл. Далее в этом направлении наблюдается часть отрицательного фокуса вековых вариаций  $Z$  в Атлантическом океане. К северу от МАУ и МИР в Индийском океане существует другой отрицательный фокус  $Z$ , четкое влияние которого видно в Порт-Альфред PAF ( $-54,1$  нТл) и Крозе CZT ( $-42$  нТл). Если сравнить эту карту с предыдущей за 1958 г. (рис. 5а), то видна большая разница в вековых вариациях. Фокус в Индийском океане захватывал часть берега Антарктиды с обсерваторией МИР. В остальном по Антарктиде изменения  $Z$  были положительными, но поле было сильно мозаичным. Резкие изменения видны между МИР и CSY. Несмотря на поперечное проведение изолиний, общая полоса повышенного векового хода  $Z$  протягивается от фокуса в Тихом океане (с максимумом 175 нТл) через АИА, НВА к обсерваториям Лазарев LZV и SYO.



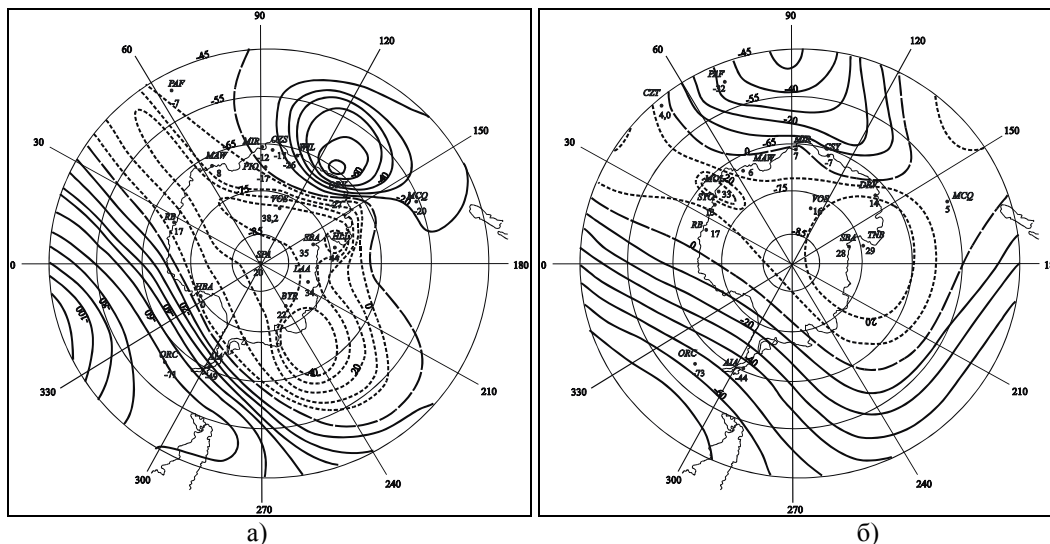


Рис. 7. Вековой ход  $H$  для 1958 г. (а) и 1997,5 г. (б). Изолинии проведены через 10 нТл.

Карта вековых вариаций  $T$  (рис. 6) во многом сходна с картой  $Z$ . Только в этом случае все вариации в Антарктике становятся отрицательными, т.к. полное поле уменьшается. Более мозаичное поле  $T$  в 1958 г. (рис. 6а), вероятно, связано как с большей интенсивностью полного магнитного поля в этот период, так и с большим количеством работавших в это время обсерваторий. Вековой ход в обсерваториях Южный полюс SPA, Вилкс WIL, Пионерская PIO, Халлет HLL во многом усложнило характер изолиний. Все эти обсерватории не работали в 2000 г., а рассчитанное по IGRF поле всегда будет плавно изменяться. В связи с этим можно судить, насколько важна постановка в Антарктике новых наблюдений.

Карта векового хода  $H$  в Антарктике (рис. 7) показывает положительные изменения, за исключением CSY,  $-6,6$  нТл (влияние отрицательного фокуса  $H$  в Индийском океане) и AIA,  $-44$  нТл (влияние Атлантического фокуса  $H$ ). Через всю Антарктиду протягивается ряд положительных фокусов от SBA и TNB на MOL и севернее приблизительно по меридиану  $40^\circ$  в сторону Мадагаскара.

На карте вековых вариаций  $H$  за 1958 г. (рис. 7а) видна в общем та же картина, но с большим приближением к Антарктиде отрицательного фокуса  $H$ , захватывающего MIR, PIO, WIL, DRV. На долготе Антарктического полуострова, наоборот, нулевая изолиния к 2000 г. переместилась вглубь материка. Вековые вариации  $Y$  для эпохи 1997.5 г. разделились на четыре несимметричных квадрата. Самый большой фокус  $Y$  величиной  $+30$  нТл выделился на  $180^\circ$ -меридиане. Он включает HLL, TNB и половину Антарктиды от  $90^\circ$ -го до  $240^\circ$ -го меридиана. Второй положительный фокус  $Y$  находится на меридиане HBA, но за пределами Антарктиды. Отрицательные фокусы  $Y$  от  $240^\circ$  до  $90^\circ$  меридиана охватывают районы расположения HBA, SNA, SYO, MOL, MAW и территории, центром которых является Антарктический полуостров.

Вариации  $X$  для эпохи 1997,5 г. только в небольшой части Антарктиды, включающей BYR, были положительными. Все остальное – это отрицательные изменения  $X$  с центрами за пределами материка: один к северу от MIR – MAW и второй – далеко к северу от HBA. 1958 г. характеризуется более интенсивными вариациями  $X$ . Положительный фокус достигал интенсивности до 38 нТл (9 нТл в 1997 г.) и простирался через южный географический полюс в направлении SYO. Отрицательный фокус с максимумом 101 нТл вблизи обсерваторий Оазис OZS и MIR охватывает все побережье от SYO до SBA и почти половину материка.

## Выводы

По данным обсерваторских наблюдений, общее магнитное поле в Антарктике уменьшается. Южный магнитный полюс при этом смещается к северу. Со времен Международного геофизического года (1958 г.) к 2000 году вековые вариации  $Z$  уменьшились в 2 раза. Вариации в горизонтальной составляющей в 3–5 раз меньше вариаций  $Z$ .

Вековые вариации в Антарктиде на многих близко расположенных обсерваториях могут резко изменяться, например, между обсерваториями Молодежная и Сева, Кейси и Оазис, что может быть связано с геологическими особенностями строения этих регионов, в том числе с крупнейшими нарушениями в коре и верхней мантии между названными пунктами. Через всю Антарктиду от Молодежной и Сева к Скотт-Бейс и Тетра-нова-Бей протягивается полоса интенсивных градиентов вековых вариаций. До этой полосы и после нее вековой ход плавный. Территорию напротив Антарктического полуострова до Хали-Бей и Санае занимает вторая узкая полоса ответвления фокуса в Тихом океане. Достаточно удаленные от AIA обсерватории Ливингстон и Арктовски, показывают одинаковый вековой ход, что также может свидетельствовать об однородности глубинного строения этого региона.

## Литература

Третьяк А.Н., Яременко Л.Н., Бахмутов В.Г. Геомагнитные вековые вариации в Антарктике // Бюлетень Українського Антарктичного Центру. – 2002. – Випуск 4. – С. 83–89.

**Яременко Л.Н.**, Мищенко Ю.П., Шендеровская О.Я. Вековые изменения геомагнитного поля в Антарктике //Бюлетень Українського Антарктичного Центру. – 2000. – Випуск 3. – С. 188–191.

**Яновский Б.М.** Земной магнетизм. — Ленинград: Изд. ЛГУ, 1978. — 591 с.

**Jankowsky J.**, Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. – IAGA. – Warsaw, 1996. – 236 p.