

УДК 550.383+550.389

ЦИФРОВАЯ КАРТА АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СЕВЕРНОГО, СРЕДНЕГО И ЮЖНОГО УРАЛА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ И ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМ

А.В. Чурсин*, А.М. Прутьян*, Н.В. Федорова**

*ФГУП Уральская геофизическая экспедиция
620024, г. Екатеринбург, пер. Саранинский, 3
E-mail: uge@r66.ru

**Институт геофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
E-mail: nata@aster.ustu.ru

Поступила в редакцию 28 апреля 2008 г.

Для территории Урала и прилегающих частей Восточно-Европейской платформы и Западной Сибири (в пределах трапеции 54–66 в.д. и 52–64 с.ш.) создана сводная цифровая карта аномального магнитного поля. Обработка геофизической информации выполнена с использованием современных компьютерных технологий. Информационной базой для создания сводных карт явились данные площадных аэрогеофизических и наземных магнитных съемок крупного, среднего и мелкого масштабов, проведенные с 1955 по 2004 годы. С целью приведения к единому уровню и увязки данных съемок выполнены наблюдения по опорным аэромагнитным профилям и создана Уральская картографическая сеть. Поправки за вековые изменения магнитного поля Земли вычислены по международным аналитическим моделям – IGRF. Цифровые данные магнитного поля для всей территории заданы через 250 м. Электронная карта в масштабе 1 : 1 000 000 представлена на 6 листах: Р-40, 41; О-40, 41; N-40, 41.

Ключевые слова: *карта аномального магнитного поля, магнитная съемка, опорная сеть, вековая вариация.*

Современная концепция Государственной геологической карты России третьего поколения масштаба 1 : 1 000 000 (Госгеолкарта-1000/3) предполагает синтез всей имеющейся геологической информации и глубокую адаптацию данных геофизики, геохимии и результатов обработки аэрокосмических съемок. Эта информация, критически рассмотренная и наполненная геологическим содержанием, будет отображена на геологической карте нового поколения и сделает ее качественно отличной от своих предшественников. Комплект сводных цифровых карт аномального магнитного поля масштаба 1 : 1 000 000 является важным элементом опережающей геофизической основы Госгеолкарты-1000/3 и служит исходным материалом при создании мелкомасштабных прогнозно-геофизических карт для основных минерагенических зон России.

Геофизическое обеспечение Госгеолкарты-1000/3 базируется на материалах ранее выполненных исследований, обработанных и проанализированных применительно к задачам мелкомасштабного геологического картирования. Для территории Урала и Западной Сибири в пределах трапеции 54–66° в.д. и 52–64° с.ш. в рамках федеральной программы «Создание прогнозно-геофизических карт для основных минерагенических зон России» создана сводная электронная карта аномального магнитного

поля (АМП) по листам Р-40, 41; О-40, 41; N-40, 41. Обработка геофизической информации выполнена с использованием современных компьютерных технологий. Информационной базой для создания сводных карт явились данные площадных аэрогеофизических и наземных магнитных съемок крупного, среднего и мелкого масштабов, хранящиеся в цифровой и аналоговой форме в региональных банках геофизических данных.

При создании сводных карт физических полей предъявляются жесткие требования к геофизической картографии, связанные с устранением внутренних дефектов в массивах данных, увязкой результатов различных съемок и приведением их к единому уровню. Особенность магнитной картографии связана с тем обстоятельством, что за период выполнения съемок, охватывающий несколько десятилетий, магнитное поле Земли значительно изменяется. При современных съемках проводят измерение модуля вектора индукции T . Для выделения аномального магнитного поля ΔT_a , вызванного источниками в литосфере, необходимо исключить магнитное поле планетарного характера T_H – главное (или нормальное) поле Земли и влияние магнитосферных источников. Модели нормальных полей, построенные по данным приземных съемок, из-за разновременности наблюдений, наличия широкого

спектра высокоинтенсивных аномалий, вызванных намагниченными источниками в верхней части земной коры, а также и из-за недоучета вековой вариации содержат значительные погрешности ± 100 нТл [Инструкция..., 1981; Магниторазведка. 1990]. Кроме того, анализ карт нормального поля T_H , составленных в ИЗМИРАН (г. Санкт-Петербург), показал, что они существенно различаются. Различие таких карт T_H , построенных в разные годы, вызвано не только тем, что геомагнитное поле и его вековой ход изменяются во времени, но и тем обстоятельством, что непрерывно совершенствовались методики построения моделей [Почтарев, 1980; Колесова, 1985]. Это приводило к несовпадению нулевых уровней на картах АМП и, соответственно, к нестыковкам изолиний ΔT_a для соседних участков съемок, если они были построены с применением моделей T_H для разных эпох.

Проведение магнитных съемок на искусственных спутниках Земли дало возможность получить картину распределения магнитного поля и его вековой вариации на всей поверхности земного шара, не оставив «белых пятен». В настоящее время существенно расширились наши знания о пространственно-временных особенностях геомагнитного поля и достаточно хорошо разработаны методические вопросы сферического гармонического анализа. Это позволило создать по единой методике международные модели главного магнитного поля Земли IGRF через каждые 5 лет [AGA..., 1995].

Для Уральского региона часть данных съемок магнитного поля имела только в относительном виде. В связи с этим, в 2004 г. для увязки данных съемок прошлых лет, а также будущих съемок и приведения к их единой модели нормального поля проведены наблюдения по аэромагнитным увязочным профилям и создана Уральская опорная картографическая сеть. Эти материалы и результаты исследования моделей главного поля и особенностей пространственно-временной структуры вековой вариации позволили составить цифровую модель карты АМП Урала, восточной окраины Европы и Западной Сибири, в которой исправлены обнаруженные ранее перекосы нормального уровня.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ МАГНИТНЫХ СЪЕМОК

Сводная цифровая карта аномального магнитного поля масштаба 1 : 1 000 000 на листы Р-40, 41; О-40, 41; N-40, 41 составлена на основе созданных ранее цифровых карт АМП масштаба 1 : 200 000. Исходным материалом для цифровых карт АМП масштаба 1 : 200 000 являлись, в основном, авторские карты, составленные по данным аэромагнитных и наземных магнитных съемок, преимущественно масштаба 1 : 50 000 и 1 : 25 000, реже крупнее а, в случаях их отсутствия (незначительная часть площадей), использованы данные по издан-

ным листам государственной карты АМП масштаба 1 : 200 000. Материалы аэромагнитных съемок использовались как в цифровой, так и в аналоговой форме. Авторские карты собирались по планшетах для топографических трапеций масштаба 1 : 200 000. На графических приложениях сводная цифровая карта аномального магнитного поля масштаба 1 : 1 000 000 приведена на шести листах, в таблицах представлена информация о материалах, использованных для их составления, и технические характеристики съемок.

Все аэромагнитные съемки, материалы которых использованы для составления цифровой карты АМП, по типам применяемой аппаратуры, навигационному обеспечению и соответственно точности съемок, можно условно разделить на 4 периода:

I-й период (1955–63 гг.). В этот период аэромагнитные съемки выполнены с **феррозондовыми** аэромагнитометрами АЭМ-49 в масштабе 1 : 200 000 и АСГМ-25 в масштабах 1 : 25 000–1 : 50 000. Аэромагнитометр АЭМ-49 имел выпускную гондолу, буксируемую на немагнитном кабеле длиной 40–45 м, с магниточувствительным блоком (МЧБ); полеты осуществлялись на высоте 200–300 м. МЧБ аэромагнитометра комплексной станции АСГМ-25 крепился жестко к фюзеляжу летательного аппарата (самолета, вертолета), поэтому полеты с этим прибором проводились на минимально доступной высоте 50–80 м при съемках масштаба 1 : 25 000–1 : 50 000, что позволяло производить одновременно измерения гамма-поля. Прокладка маршрутов осуществлялась визуально по топографическим картам различного масштаба, по видимым ориентирам и без инструментальной привязки. Иногда в этот период применялся аэромагнитометр АМФ-21, являющийся несколько улучшенной модификацией станции АСГМ-25. Основными недостатками применяемых приборов были высокая инерционность и нестабильность работы. Это не позволяло получать высокую точность измерений приращений вектора магнитной индукции ΔT . Погрешность измерений составляла $\pm 10 \div 100$ нТл.

II-й период (1964–76 гг.). Аэромагнитные съемки в этот период проводились также феррозондовыми магнитометрами в модификациях АСГ-45, АСГ-46, АММ-13, АСГ-48 и АСГ-48М2 в масштабах 1 : 25 000–1 : 50 000. В этих приборах была уменьшена инерционность измерений ΔT и повышена стабильность их работы. Полеты проводились с обтеканием рельефа на высоте 50–80 м. Прокладка маршрутов выполнялась визуально штурманом по картам, контроль точности привязки осуществлялся методом фотографирования ориентиров (фотопривязкой). Погрешность измерений составляла $\pm 2 \div 25$ нТл.

III-й период (1976–97 гг.). В этот период при аэро- и наземных магнитных съемках стали применять квантовые и протонные магнитометры с чувствительностью 0,1–0,01 нТл с дискретными из-

мерениями полного вектора магнитной индукции T через 0,25–1 сек. Среднеквадратические погрешности аэромагнитных съемок, выполненных квантовыми аэромагнитометрами КАМ-28 и ММ-305 (с выпускными гондолами), протонными аэромагнитометрами ММС-214, АГС-71М, СКАТ-77 (жесткое крепление МЧБ) и ММВ-215 (с выпускной гондолой) не превышали ± 5 нТл. При навигационном топографическом обеспечении измерений, наряду с методом фотопривязки, применялись радиогеодезические системы при прокладке и контроле положения маршрутов. Погрешность измерений составляла $\pm 2 \div 16$ нТл.

IV-й период (1998–2005 гг.). В 1998 г. при аэромагнитных съемках на описываемой территории начали применять новейшие квантовые магнитометры с цезиевыми и калий-рубидиевыми МЧБ, имеющими повышенную чувствительность (до 0,001 нТл) и дискретность измерений в секунду от 4 до 16. При прокладке маршрутов стали широко применять навигационные комплексы, использующие сигналы спутниковых станций «ГЛОНАСС», «НАВСТАР». Это позволило проводить съемки в активном режиме (прокладывать маршрут по стрелочному индикатору) с погрешностью $\pm 7 \div 10$ м и среднеквадратической погрешностью привязки топографического положения точек измерения $\pm 2 \div 5$ м [Чурсин и др., 1994]. Среднеквадратическая погрешность аэромагнитных съемок последних лет лежит в пределах $\pm 1 \div 3$ нТл.

В настоящее время, в результате применения при аэромагнитных съемках аппаратуры нового поколения, оснащенной цифровыми средствами записи информации непосредственно на борту самолета, использования активной спутниковой навигации и компьютерных технологий обработки материалов, обеспечивается высокая надежность фиксации слабоинтенсивных аномалий и получение практически неискаженных (из-за инерционности или низкой скорости записи) значений модуля индукции магнитного поля. Вследствие этого, значительно повысилась эффективность современных аэромагнитных съемок. Такими современными съемками были выполнены измерения на больших участках для территории листов Р-40 и 41.

В процессе составления сводной карты при перекрытии участка площади разными съемками предпочтение отдавалось съемкам более детальным и с лучшими характеристиками, как по точности измерений магнитного поля, так и по топографическому обеспечению. За основу брались съемки, удовлетворяющие ряду критериев:

- масштаб съемки 1 : 50 000 и крупнее;
- съемка по широтным маршрутам;
- средняя высота полета 70 м;
- высокая точность измерений магнитного поля;
- высокая точность топографической привязки (желательно спутниковая);

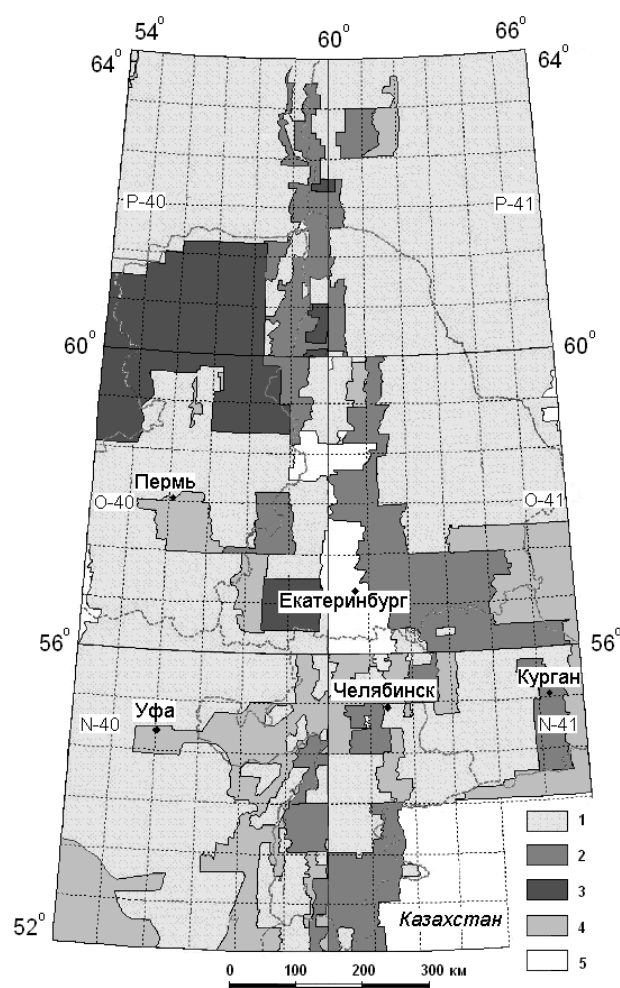


Рис. 1. Схема изученности магнитными съемками территории Урала и прилегающих платформ.

1–3 – аэромагнитные съемки масштаба 1 : 25 000 – 1 : 50 000 и крупнее: 1 – удовлетворяющие по точности требованиям ГДП (погрешности $\pm 5 \div 15$ нТл); 2 – не удовлетворяющие по точности требованиям ГДП (погрешности более 15 нТл); 3 – высокоточные современные съемки, удовлетворяющие по точности требованиям ГДП (погрешности $\pm 1 \div 3$ нТл); 4 – съемки масштаба 1 : 200 000, не удовлетворяющие требованиям ГДП по масштабу; 5 – наземные магнитные съемки.

– соответствие нулевого уровня поля участка уровню на имеющихся картах АМП масштаба 1 : 200 000.

В отдельных случаях, при низкой точности аэромагнитных измерений, или там, где, в силу объективных причин, они не проводились (осевая часть Среднего и Южного Урала), были использованы материалы наземных магнитных съемок.

В обобщенном виде состояние изученности аэромагнитными съемками территории Южного, Среднего, Северного и Приполярного Урала показано на схеме (рис. 1). За основу классификации съемок принято соответствие данных съемок требованиям и методическим рекомендациям по геофизическому обеспечению съемочных работ ГДП

(геологическое доизучение площади) масштаба 1 : 200 000. [Временные..., 1999; Методические..., 2000]. Приведенная схема показывает, что для 80 % территории использованы материалы съемок, удовлетворяющие этим требованиям. Однако, выполнив свою роль в предыдущие годы при составлении геологических карт соответствующих масштабов, на сегодняшний день, при детальном исследовании, эти материалы в значительной мере устарели, в основном, из-за недостаточной точности топографической привязки. Как следует из рисунка, лишь часть съемок, выполненных в последние годы с применением активной спутниковой навигации и высокоточных магнитометров, удовлетворяют требованиям ГДП-200 нового поколения. Хотелось бы отметить, что материалы современных разновысотных аэромагнитных съемок позволяют изучать особенности строения магнитоактивного слоя земной коры и играют важную роль в региональных глубинных построениях при создании моделей формирования и эволюции Уральского орогенного пояса [Чурсин и др., 1985, 1998, 2000, 2005; Шапиро и др., 1988, 1993; Федорова, 2001; Федорова и др., 2001; Чурсин, Федорова, 2002].

При составлении сводной цифровой карты АМП использованы, в основном, данные аэромагнитных съемок. На участках, где отсутствовали аэромагнитные съемки (на схеме рис. 1 отчетливо видны «белые пятна» в центральной части Среднего Урала), использованы данные наземных съемок. Отличительная особенность наземных съемок состоит в том, что при наблюдениях применялась аппаратура разного типа, с помощью которой измерялись различные составляющие магнитного поля: вертикальная составляющая Z_a аномального магнитного поля (магнитометры М-2, М-23, М-27) и T – модуль вектора магнитной индукции (ММП-203 и его аналоги). Для того, чтобы оценить, какие погрешности возникают при использовании карт изодинам Z_a при составлении сводной карты АМП ΔT_a , были проведены дополнительные исследования. По результатам контрольных измерений на поверхности земли различия значений ΔT_a и Z_a в одних и те же точках составили ± 30 нТл. При этом на графиках ΔT_a и Z_a наблюдается почти полная повторяемость поведения кривых, даже в высокоградиентных зонах аномалий. По профилю Кедрово-Космаково (Средний Урал, листы О-41-XXV, XXXI) **выполнена аэромагнитная съемка со спутниковой навигацией**. Полученные при аэромагнитной съемке значения ΔT_a были сопоставлены со значениями Z_a , снятыми с карт. В спокойных полях среднеквадратическая ошибка составила ± 5 нТл. Было установлено, что разница в уровнях магнитного поля, измеренного и снятого с карт, колеблется в пределах 10–50 нТл, в среднем составляет ± 31 нТл. В зонах интенсивных аномалий наблюдаются несколько большие расхождения, что вызвано, главным образом, различия-

ми в высотах измерений. Высота при аэросъемке составляла 50–100 м, а при наземной съемке – 1 м. Подобные значения погрешностей получены при сопоставлении материалов съемок T и Z по другим участкам. В результате проведения уравнивания данных по площади расхождения в аномальных магнитных полях по границам наземной и аэромагнитной съемок становились существенно меньше 5–10 нТл. Такие значения погрешностей удовлетворяют требованиям к данным для карт масштаба 1 : 200 000 (1 : 1 000 000). Следовательно, использование этих данных позволяет ликвидировать «белые пятна» на сводных картах АМП.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ПОСТРОЕНИЯ СВОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТ АМП

Сводные цифровые карты аномального магнитного поля масштаба 1 : 1 000 000 составлялись в два этапа. Вначале создавались цифровые карты АМП по листам масштаба 1 : 200 000. Исходные данные аэромагнитных съемок использовались как в цифровой, так и в аналоговой форме. Данные наземных магнитных съемок, в основном, имелись в аналоговой форме. Эти карты, представленные в виде изолиний ΔT_a , как правило, были привязаны к разным моделям нормального поля.

Операции составления сводных карт АМП проводились, в основном, в двух программных пакетах: БанкГеоИнф и ArcView. Первый пакет служил для хранения, поиска, систематизации, обработки, преобразования форматов данных и обмена с другими программами. Второй пакет служил, в основном, для визуализации данных и окончательного оформления графического изображения карт. В процессе создания карт между этими двумя программами постоянно осуществлялись операции импорта-экспорта. Для переноса карт в аналоговой форме в цифровой формат производилось их сканирование на широкоформатном сканере по каждому листу. По скан-образу проводилась векторизация изолиний с указанием значений АМП и их привязка к географическим координатам в программе MapEdit. Цифровые данные вводились с матриц или с электронных карт изолиний. Векторизованная карта и цифровые данные по каждому листу масштаба 1 : 200 000 экспортировались в программу ArcView, из которой далее экспортировались в программу БанкГеоИнф.

С помощью пакета программ БанкГеоИнф создавалась соответствующая тема (например, «Изолинии АМП»), для заданной топографической трапеции. Аналогичные темы создавались и для участков, входящих в контур данной трапеции. Этот контур экспортировался в формат ArcView. Туда же экспортировалась заранее векторизованная, оцифрованная и привязанная к той же системе координат

карта изолиний вместе с контуром участка съемки. Для трапеции, контура участка и изолиний создавались свои темы. Если карта изолиний выходила за пределы трапеции, то в пакете БанкГеоИнф производили обрезку этих изолиний по контуру трапеции. Таким способом создавалась основа карты.

Далее проводилось дополнение планшета картами изолиний по соседним участкам, входящим в данную трапецию. При этом добавлялись участки съемок, наиболее соответствующие указанным выше условиям. В пакете ArcView проводилось сопоставление изолиний по добавляемому участку с изолиниями планшета. Если добавляемый участок перекрывал существующую карту, то добавляемые изолинии обрезались по контуру старого участка. В том случае, если нулевые уровни карт АМП по соседним участкам совпадали, в ArcView проводилось совмещение концов одноименных изолиний исходной карты и добавляемого участка. Участок с обрезанными и совмещенными изолиниями экспортировался в пакет БанкГеоИнф и проводилось объединение изолиний добавляемого участка с одноименными изолиниями исходной карты масштаба 1 : 200 000. При этом изолинии добавляемого участка становились неотъемлемой частью создаваемой карты. В ситуациях, когда нулевые уровни полей добавляемого участка и исходной карты не совпадали, и различия на краях участков были примерно постоянными по всему периметру, тогда вычислялась средняя величина отклонения и вводилась поправка в поле добавляемого участка. Участок с исправленным уровнем изолиний экспортировался в ArcView, где производилась стыковка концов изолиний исходной карты и добавляемого участка. Затем участок с совмещенными изолиниями экспортировали в БанкГеоИнф и объединяли его с исходной картой.

В тех случаях, когда уровень поля добавляемого участка не совпадал с уровнем исходной карты, и разница не была постоянной по периметру, вводилась градиентная поправка в уровень поля добавляемого участка. Методика введения этой поправки сложнее. Вначале вычислялись отклонения по каждой из сторон участка, которые заносились в пакет БанкГеоИнф. Затем карта изолиний участка экспортировалась в программу Surfer и там формировалась матрица исходного поля. Данная матрица экспортировалась в пакет БанкГеоИнф, в котором исходная матрица по известным значениям отклонений пересчитывалась в уравненную матрицу. Данная матрица снова экспортировалась в Surfer и по уравненной матрице создавалась карта изолиний. Уравненная карта изолиний экспортировалась в ArcView, затем производилось совмещение концов одноименных изолиний добавляемого участка и исходной карты. Исправленные изолинии экспортировались в БанкГеоИнф, производилось их объединение с изолиниями исходной карты. Файл

с объединенными изолиниями экспортировался в ArcView. Аналогично добавлялись изолинии по другим участкам до тех пор, пока топографическая трапеция масштаба 1 : 200 000 не была полностью закрыта. Затем концы изолиний формируемой карты совмещались с одноименными изолиниями соседних топографических трапеций. Исправленные таким способом изолинии АМП экспортировались в БанкГеоИнф и проводили окончательное формирование файла изолиний данной трапеции.

Для того чтобы построить графическое изображение карт изолиний с заливкой полигонов, в пакете БанкГеоИнф из файла изолиний формировался файл полигонов. Полигоны формировались из изолиний путем их замыкания либо объединения с границей трапеции. Созданные полигоны экспортировались в ArcView, где на карте производилась их заливка краской в соответствии с принятой шкалой раскраски аномального магнитного поля, а также выводились надписи для изолиний. Для окончательного формирования графического изображения электронной карты в ArcView к слоям основного геофизического параметра добавлялись слои сопутствующей информации: генерализованная топографическая основа (водоемы, населенные пункты, важнейшие дороги и т.д.), контур трапеции, градусная сетка. Добавлялось также зарамочное оформление: условные обозначения, масштабная шкала, шкала раскраски АМП, схема использованного материала, таблица магнитной изученности, угловой штамп и т.д.

В результате перечисленных операций для Уральского региона были получены 204 карты АМП масштаба 1 : 200 000. Чтобы сохранить основные особенности аномального магнитного поля Урала, для этих карт опытным путем была подобрана оптимальная сетка задания данных (матрица) с интервалами по прямоугольным координатам X и Y – 250×250 м. Расчет матрицы производился из авторской карты по программе Surfer. При этом использовался алгоритм радиальной базовой функции с радиусом исследования 20 км. Для исключения краевых эффектов использовались карты обрамления того же масштаба. Как правило, карта изолиний, построенная по такой матрице, выглядит несколько угловатой. Поэтому для сглаживания данных использовался алгоритм низкоуровневой гауссовой фильтрации. По рассчитанной и сглаженной матрице построена карта изолиний АМП ΔT_a , которая вместе с матрицей экспортирована в программу БанкГеоИнф для хранения и дальнейшего использования. Окончательное построение карт выполнено по программе ArcView. На заключительном этапе создана сводная цифровая карта АМП масштаба 1 : 1 000 000, которая построена из карт масштаба 1 : 200 000 путем их объединения в единый планшет.

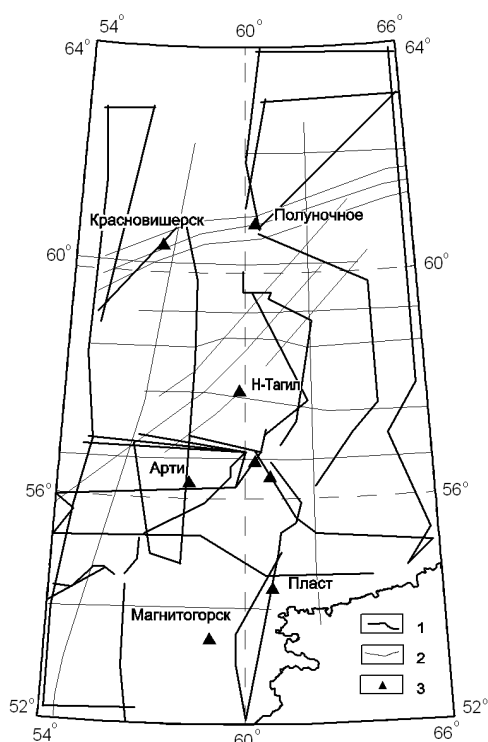


Рис. 2. Схема Уральской картографической сети опорных аэромагнитных профилей.

1 — увязочные профили (съемка 2004 г.), 2 — региональные профили (съемки 1980–96 гг.), 3 — пункты наблюдений магнитных вариаций.

УРАЛЬСКАЯ КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ОПОРНАЯ АЭРОМАГНИТНАЯ СЕТЬ

Исходным материалом при создании цифровых карт послужили данные магнитометрических съемок, выполненных в период с 1955 по 2004 годы. Естественно, что материалы съемок, проведенные в течение столь длительного периода, требуют тщательного учета вековых изменений геомагнитного поля. Поэтому для уменьшения погрешности выделения АМП необходимо было провести дополнительные исследования возможности применения тех или иных моделей нормального поля Земли и его вековой вариации. Ранее при составлении карт аномального магнитного поля Российской Федерации в качестве поля относимости использовались модели ИЗМИРАН [Инструкция..., 1981; Магниторазведка. 1990]. Дальнейшие исследования показали, что на существующих картах значительно искажена региональная составляющая аномального магнитного поля. При сопоставлении графиков ΔT_0 , снятых с карт, и данных специальной аэромагнитной съемки по региональным пересечениям Урала, выявлены скачки в уровнях достигающие 200 нТл [Чурсин и др., 1985, Шапиро и др., 1988].

Для увязки данных съемок прошлых лет, а также будущих съемок в 2004 г. Уральской геофизи-

ческой экспедицией проведена съемка по опорным увязочным профилям (рис.2). Аэрогеофизическая съемка осуществлялась на самолете АН-2, с современной аппаратурой: квантовым аэромагнитометром МГМ-06, спутниковой навигационной системой GPS NAVSTAR с применением аппаратуры «АБРИС-ГЕО» и радиовысотомером А-037. Полеты проводились по прямолинейным маршрутам с обтеканием рельефа местности на высоте 60–80 м. Все измеренные данные в цифровом виде регистрировались на бортовом компьютере.

Съемка по сети опорных увязочных геофизических профилей проведена в спокойное время прохождения геомагнитных вариаций, амплитуды солнечно-суточных вариаций T не превосходили 30 нТл. Все дни съемки обеспечены наблюдениями вариаций на магнитовариационных станциях (МВС) и в обсерватории Арти. Наблюдения на МВС выполнены протонными станциями МВ-01 с дискретностью записи данных на компьютер через 1 сек. Полевые МВС располагались в районах проведения съемочных полетов вблизи городов: Красновишерск, Ханты-Мансийск, Магнитогорск и др. (рис. 2). Средняя квадратическая погрешность работы МВС по независимым измерениям второго прибора составила $\pm 0,9$ нТл.

Определение погрешности аэрогеофизической съемки проводилось по данным повторных наблюдений на отрезках маршрутов и в точках пересечений меридиональных и широтных профилей. Величина среднеквадратической погрешности аэромагнитной съемки составила $\pm 3,6$ нТл. Такая погрешность данных вполне удовлетворяет параметрам, предусмотренным геологическим заданием по проекту (± 5 нТл) [Инструкция..., 1995]. Для определения погрешностей привязки координат проведены летные испытания, имитирующие полеты при аэрогеофизических съемках. Для этой цели использованы девять тумб Свердловского образцового топографического базиса. Выполнены 36 залетов в прямом и обратном направлениях, и вычислены значения координат в точках пересечений фактических линий полетов и оси, проведенной в створе центров тумб. Средняя квадратическая погрешность определения координат составила ± 5 м. Таким образом, при проведении полетов по опорным профилям получены довольно низкие значения погрешностей измерений магнитного поля и определения планового положения точек измерений.

Создание информационной базы и первичная обработка результатов измерений выполнена с учетом специфики исходных данных. В частности, процесс начинался с приведения исходных маршрутных данных к единой системе координат. Маршруты были пересчитаны из географической системы для эллипсоида WGS-84 в систему координат эллипсоида Красовского и переведены в прямоугольную систему координат Гаусса-Крюгера. После ввода

пересчитанных координат в систему данных формирования информационной базы сопровождалось анализом и редукцией материалов с использованием методов визуализации и аналитики.

Для создания опорной сети кроме увязочных профилей были привлечены данные измерений магнитного поля по сети региональных аэромагнитных профилей Уральского региона, выполненные в 1980–1996 гг. (рис. 2) [Чурсин и др., 1985]. Значения магнитного поля на этих профилях были приведены к эпохе 2004 г. Для этого были введены поправки за вековую вариацию геомагнитного поля, значения которых были рассчитаны по данным измерений в местах пересечений региональных и увязочных профилей. На основе этих высокоточных абсолютных измерений T на увязочных и региональных профилях была создана Уральская картографическая аэромагнитная опорная сеть на территорию Южного, Среднего и Северного Урала и прилегающих территорий Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (рис. 2).

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕКОВОЙ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Исследования вековой вариации геомагнитного поля показали, что интенсивность векового хода и географическое положение его фокусов с течением времени меняются. С 1950 по 2005 г. амплитуды векового хода в пределах Уральского региона изменялись довольно значительно и составляли от -20 до $+55$ нТл в год. Рассмотрены международные аналитические модели нормального поля Земли – IGRF [IAGA..., 1995] и модели ИЗМИРАН (г. Санкт-Петербург), которые предназначены для магнитной картографии на территории России [Почтарев, 1980]. В нашем распоряжении имелись модели ИЗМИРАН для эпох 1965, 1990 и 2000 годов, представленные в графическом виде. Модели IGRF представлены в виде сферического гармонического ряда, параметры которого определяют через каждые пять лет, вековая вариация для пятилетнего интервала моделируется по линейному закону. Для эпохи 1965 года различие нормальных полей T_H моделей ИЗМИРАН и IGRF на северо-востоке (лист Р-41) составляют -100 нТл, на юго-западе территории (лист N-41) – $+150$ нТл. Эти расхождения в нормальных полях моделей соответственно скажутся на значениях нулевых уровней карт аномального магнитного поля.

Сопоставление значений модуля индукции T_H этих моделей показало, что по картам ИЗМИРАН за 35 лет с 1965 по 2000 г. вековые изменения составляли от 200 нТл на юго-востоке до 600 нТл – на северо-западе изучаемой территории (рис. 3а). Для этого же временного периода по данным моделей IGRF значения T_H увеличились на 300 нТл на юго-востоке и на 590 нТл на северо-западе (рис. 3б). Различия между вековыми изменениями T_H для

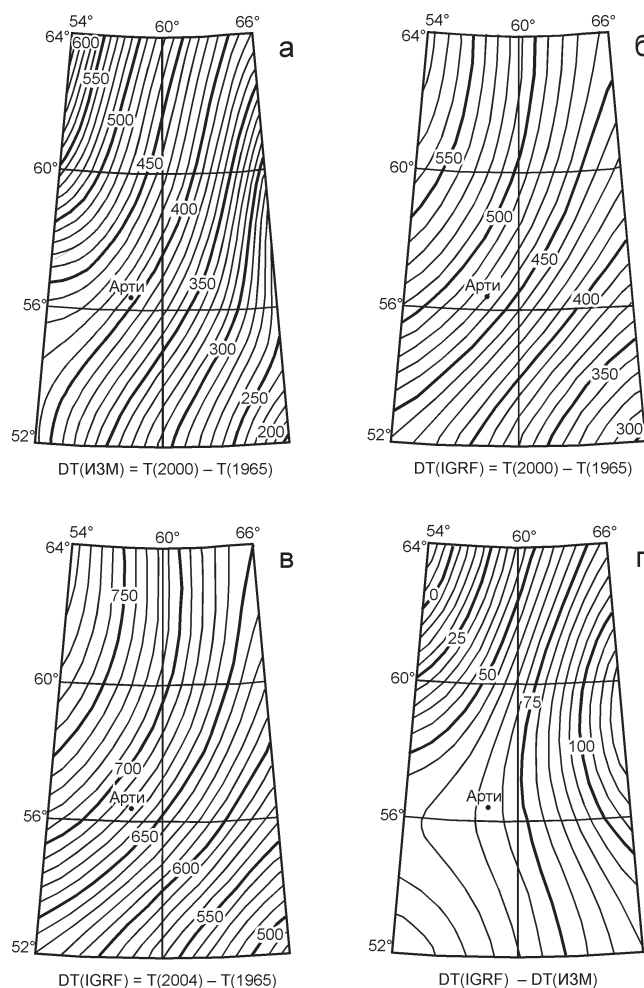


Рис. 3. Вековые изменения геомагнитного поля T_H , вычисленные по моделям: а – ИЗМИРАН за период 1965–2000 гг., б – IGRF за период 1965–2000 гг., в – IGRF за период 1965–2004 гг., г – различие между данными IGRF и ИЗМИРАН за период 1965–2000 гг. (в нТл).

этих моделей показаны на рис. 3г и составляют от -10 нТл на северо-западе до $+120$ нТл на востоке территории. По результатам наблюдений на искусственных спутниках Эрстед, Чамп и Эрстед-2 в 2000–2002 гг., фокус вековой вариации геомагнитного поля – T располагался над Уралом и наблюдался большой вековой ход – до $+55$ нТл в год [Olsen, 2002]. За четыре года с 2000 г. по 2004 г. геомагнитное поле на всей территории выросло почти на 200 нТл. Изменения за период 1965–2004, рассчитанные по моделям IGRF, составляют от 480 нТл на юго-востоке до 790 нТл на северо-западе (рис. 3в).

Проверить соответствие моделей нормальных полей T_H истинным значениям геомагнитного поля можно по результатам наблюдений в магнитных обсерваториях. На территории съемок расположена геофизическая обсерватория Арти (Свердловская область), в которой непрерывные наблюдения магнитного поля Земли проводятся с 1964 г. В данные

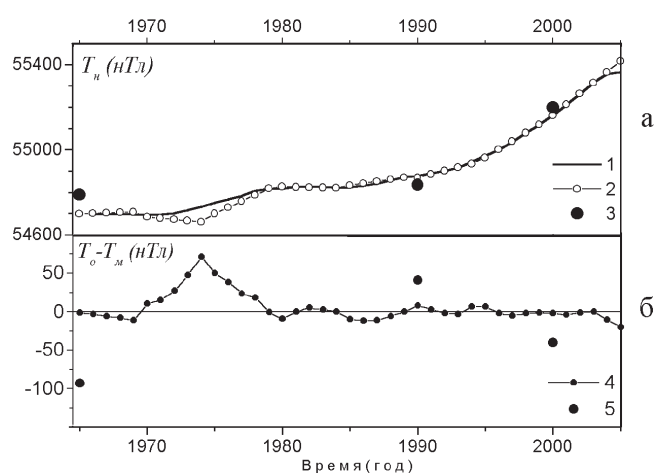


Рис.4. Изменения геомагнитного поля в обсерватории Арти.

а – значения T_H (1 – данные наблюдений, 2 – модели IGRF, 3 – модели ИЗМИРАН), б – разности между измеренными и модельными значениями (4 – IGRF, 5 – ИЗМИРАН).

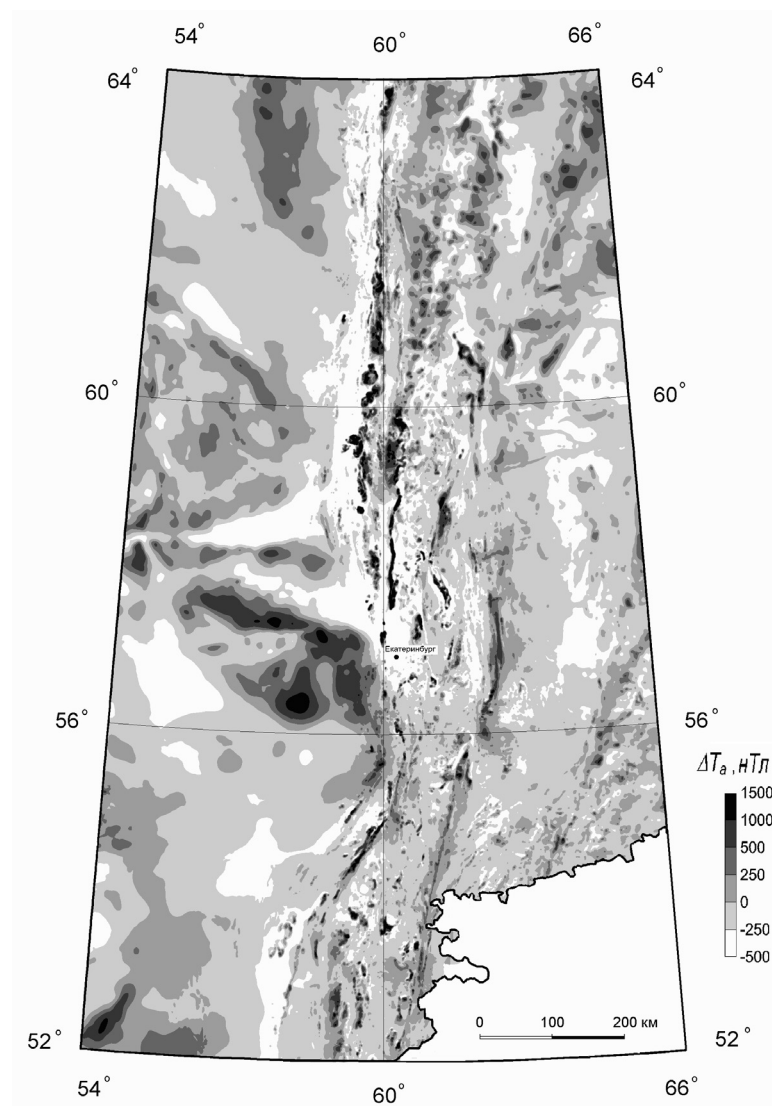


Рис. 5. Сводная карта аномального магнитного поля ΔT_a Урала и прилегающих частей Восточно-Европейской платформы и Западной Сибири.

обсерватории T при построении графика T_H введена поправка и вычтено значение аномального магнитного поля $\Delta T_a = 450$ нТл. Расхождения между значениями T_H моделей ИЗМИРАН с данными измерений в магнитной обсерватории Арти значительные и достигают 96 нТл (рис. 4). Как видно из рисунка, аналитические модели IGRF лучше соответствуют данным измерений, для изучаемого периода различия значений векового хода редко превышают 20 нТл в год. По данным обсерватории Арти рост магнитного поля T с 1965 по 2004 г. составляет 691 нТл, а по данным моделей IGRF – 680 нТл. Поэтому для введения поправок за вековую вариацию лучше использовать модели IGRF.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ АМП ОТНОСИТЕЛЬНО МОДЕЛИ НОРМАЛЬНОГО ПОЛЯ ИЗМИРАН 1965

Геофизическая секция Научно-редакционного Совета Роснедра рекомендовала при создании сводной карты аномального магнитного поля России в качестве поля относимости использовать модель нормального поля ИЗМИРАН 1965 года. В данные съемок по сети опорных профилей поправки за вековую вариацию магнитного поля за период с 1965 по 2004 г. введены по разностям T_H для моделей IGRF. Создание цифровой модели аномального магнитного поля на основе модели нормального поля ИЗМИРАН 1965 осуществлялось по следующему алгоритму:

1. По данным сети опорных региональных аэромагнитных профилей, приведенных к нормальному полю ИЗМИРАН эпохи 1965 г., построена матрица по сети 2×25 км – матрица 1.

2. По цифровым моделям карт масштаба 1 : 200 000, созданным на всю территорию (204 листа), построена матрица по вышеуказанной методике по сети 25×25 км (матрица 2). Для этих же данных построена матрица по сетке 250×250 м – матрица 4.

3. Получена разностная матрица путем вычитания из матрицы 1 матрицы 2. Методом сплайн-интерполяции результаты преобразованы в матрицу с шагом 250×250 м – матрица 3. Данная матрица 3 представляет собой основу для введения

поправок по всем шести листам карты масштаба 1 : 1 000 000.

4. Получена окончательная матрица 5 в результате сложения матрицы 4 с матрицей 3. Эта матрица является основой для цифровой модели ΔT_a – аномального магнитного поля относительно нормального поля ИЗМИРАН 1965 г. для сети 250 × 250 м. Дополнительно на эти листы составлены «генерализованные» матрицы по сети 1 × 1 км.

5. По цифровым данным составлена электронная карта ΔT_a масштаба 1 : 1 000 000 на 6 листах: Р-40,41; О-40,41; N-40,41 (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведенной работы составлена цифровая модель карты аномального магнитного поля ΔT_a Урала и прилегающих территорий Восточно-Европейской платформы и Западной Сибири, в которой исправлены обнаруженные ранее перекосы нормального уровня. Карта подготовлена в соответствии с требованиями к геофизической основе государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения. Сводная карта с большой детальностью отражает все основные особенности аномального магнитного поля Урала (рис. 5). Все 6 листов карты АМП масштаба 1 : 1 000 000 составлены в виде цифровых моделей и могут быть легко тиражированы. Научно-редакционный совет по геологическому картированию территории Российской Федерации Роснедра принял эти карты и рекомендовал использовать их при составлении Госгеолкарты-1000/3. В настоящее время построенная карта АМП используется для составления прогнозно-геофизических карт и исследования новых перспективных районов для поисков полезных ископаемых.

Большой объем кропотливой работы по составлению карты АМП выполнен сотрудниками Федерального государственного унитарного предприятия «Уральская геофизическая экспедиция», которым авторы выражают свою признательность. Авторы благодарны С.Н. Кашубину, Т.П. Литвиновой, В.С. Цирелю и Ю.М. Эринчику за практическую помощь, поддержку и методические рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Временные требования к организации, проведению и конечным результатам геологосъемочных работ, завершающихся созданием Госгеолкарты-200 (второе издание). М.: МПР РФ, 1999. 160 с.
- Инструкция по магниторазведке: наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка / Под ред. Ю.С. Глебовского и В.Е. Никитского. Л.: Недра, 1981. 263 с.
- Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. М.: Роскомнедра, 1995. 244 с.
- Колесова В.И. Аналитические методы магнитной картографии. М.: Наука, 1985. 222 с.
- Магниторазведка. Справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. М.: Недра, 1990. 470 с.
- Методические рекомендации по геофизическому обеспечению геологосъемочных работ м-ба 1 : 200 000. СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. 240 с.
- Почтарев В.И. Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1980. 268 с.
- Федорова Н.В. Модели намагниченности земной коры по геотраверсу Гранит // Уральский геофизический вестник. 2001. № 2. С. 88–93.
- Федорова Н.В., Шапиро В.А., Чурсин А.В. Моделирование магнитных и гравитационных аномалий в районе профиля Уралсейс. // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс). / Гл. ред. А.Ф. Морозов. Тверь: ГЕРС, 2001. С. 238–241.
- Чурсин А.В., Душин А.В., Верник И.И. и др. Глубинное геологическое строение Северного и Приполярного Урала (ХМАО-Югра) и прилегающих окраин платформ по геофизическим данным // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Т. 3. / Под ред. В.И. Карасева. Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2005. С. 18–31.
- Чурсин А.В., Масловский А.И., Эбель М.К. Применение навигационного комплекса, созданного на базе приемоиндикатора ТНЛ-1000 для активного самолетовождения при аэрогеофизических съемках // Тезисы 10 научно-практ. конф., посвященной 75-летию геодезической службы России. Екатеринбург: Уралаэрогеодезия, 1994. С. 27–29.
- Чурсин А.В., Федорова Н.В. Обработка и интерпретация материалов // Геотраверс «Гранит»: Восточно-Европейская платформа-Урал-Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Ред. С.Н. Кашубин. Екатеринбург: ИРА УТК, 2002. С. 176–186.
- Чурсин А.В., Федорова Н.В., Гаврилова Н.А. Построение магнитных моделей по геотраверсам // Геологической службе России 300 лет. СПб: Welcome, 2000. С. 60–61.
- Чурсин А.В., Федорова Н.В., Шапиро В.А. Отображение особенностей глубинного строения Урала в аномальном магнитном поле // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерализации подвижных поясов и платформенных областей литосферы / Отв. ред. Б.П. Рыжий. Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 1998. С. 217–218.
- Чурсин А.В., Шапиро В.А., Карымов М.Г. и др. К вопросу о геомагнитной модели Урала // Региональная металлогения Урала и связь орудене-

- ния с глубинным строением. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. С. 209–211.
- Шapiro В.А., Чурсин А.В. Никонова Ф.И. и др. Магнитное поле и его динамика при изучении глубинного строения Урала // Глубинное строение Урала и сопредельных регионов. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 114–123.
- Шapiro В.А., Никонова Ф.И., Федорова Н.Е. и др. Строение магнитоактивного слоя Северного Урала по геомагнитным данным // Докл. РАН. 1993. Т. 330. № 6. С. 38–41.
- IAGA Division V. Working Group 8. International geomagnetic reference field, 1995 revision // J. Geomag. Geoelectr. 1995. V. 47. № 12. P. 1257–1261.
- Olsen N. A model of geomagnetic field and its secular variation for epoch 2000 estimated from Orsted data // Jeophys. J. Int. 2002. № 149. P. 454–462.

Рецензент доктор геол.-мин. наук В.И. Филатов

DIGITAL ANOMALOUS MAGNETIC FIELD MAP OF THE NORTHERN, MIDDLE, SOUTHERN URALS AND ADJACENT TERRITORIES OF THE EAST-EUROPEAN AND WEST-SIBERIAN PLATFORMS

A.V. Chursin*, A.M. Prutyan*, N.V. Fedorova**

*Urals Geophysical Expedition

**Institute of Geophysics, Urals Branch of RAS

The combined digital map of the anomalous magnetic field was created for the Urals region and adjacent territories of the East-European and West-Siberian platforms (geographic trapeze 54–66° eastern longitude и 52–64° northern latitude). Modern computer technology has been used for geophysical data elaboration. Aero and near earth magnetic surveys of large, medium and small scales produced from 1955 to 2004 years were used as a base information of the map. The surveillances on basic aeromagnetic profiles were made and the Urals map network was founded for the transformation of obtained data to the single level. Corrections for secular variation of the Earth magnetic field were calculated with international analytical models – IGRF. The digital data were given across 250 m intervals all over the territory. The electronic map is produced on 6 sheets for the scale 1 : 1 000 000: P-40, 41; O-40, 41; N-40, 41.

Key-words: *anomalous magnetic field map, magnetic survey, basic net, secular variation.*