

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
**Итоги Электронного Геофизического Года**  
3–6 июня 2009 • Переславль-Залесский, Россия

## Технология создания цифровых карт Главного магнитного поля Земли

Е. А. Жалковский,<sup>1</sup> В. И. Никифоров,<sup>2</sup> А. М. Мерзлый,<sup>1</sup> А. Е. Березко,<sup>1</sup> А. А. Соловьев,<sup>1</sup> А. В. Хохлов,<sup>3</sup>  
О. В. Никифоров,<sup>1</sup> В. В. Снакин,<sup>4</sup> Г. Ф. Митенко,<sup>4</sup> П. А. Шарый,<sup>4</sup> В. Р. Хрисанов,<sup>4</sup> В. П. Головков,<sup>5</sup>  
Т. Н. Бондарь,<sup>5</sup> и Е. Е. Жалковский<sup>6</sup>

Получено 26 октября 2009; принято 14 ноября 2009; опубликовано 17 декабря 2009.

В ходе создания Атласа Главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) разрабатывается серия цифровых карт магнитного поля Земли с отображением особенностей картографируемого объекта, среди них карты Главного магнитного поля Земли; аномальной и частотной составляющих ГМПЗ; характеристик пространственной структуры МПЗ и отражение вариационных циклов. При создании цифровых карт ГМПЗ выбраны и обоснованы проекции и масштаб картографирования, проанализированы исходные данные (источники информации), применяемые для создания цифровых карт ГМПЗ. Разработана технология создания цифровых карт ГМПЗ по данным сети наблюдений и информации центров сбора, хранения, обработки данных. Организована конвертация данных, оценка актуальности данных, решены задачи генерализации. При разработке методов и технологий создания цифровых карт МПЗ применяется профессиональный инструментальный и программное обеспечение. Цифровые карты изготовлены на лицензионном программном обеспечении ArcGIS в растровом и векторном форматах. Сформированы требования к описанию карт ГМПЗ, проводится экономическая оценка альтернативных методов изучения ГМПЗ, разработаны технологии для процессов редактирования карт, контроля качества и издания цифровых карт ГМПЗ. Решаются вопросы авторства при создании цифровых карт ГМПЗ. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** атлас, цифровая карта, ГИС, магнитное поле Земли, модель поля.

**Ссылка:** Жалковский, Е. А., В. И. Никифоров, А. М. Мерзлый, А. Е. Березко, А. А. Соловьев, А. В. Хохлов, О. В. Никифоров, В. В. Снакин, Г. Ф. Митенко, П. А. Шарый, В. Р. Хрисанов, В. П. Головков, Т. Н. Бондарь, и Е. Е. Жалковский (2009), Технология создания цифровых карт Главного магнитного поля Земли, *Росс. ж. наук о Земле*, 11, RE2007, doi:10.2205/2009ES000398.

В Геофизическом центре РАН создается Атлас Главного магнитного поля Земли (ГМПЗ), который будет включать коллекцию цифровых карт магнитного поля Земли с 1500 по 2010 гг. с отображением особенностей картогра-

фируемого объекта, таких как ГМПЗ; аномальной и частотной составляющих ГМПЗ; характеристик пространственной структуры ГМПЗ и отражение вариационных циклов. При создании цифровых карт ГМПЗ были выбраны и обоснованы проекции и масштаб картографирования, проанализированы исходные данные (источники информации). Разработана технология создания цифровых карт ГМПЗ по данным сети наблюдений и информации центров сбора, хранения, обработки данных. Разработанная технология создания цифровых карт ГМПЗ включала в себя следующие основные этапы:

1. Создание массивов исходных данных ГМПЗ.
2. Создание цифровых карт в среде геоинформационной системы (ГИС) [Березко и др., 2008, 2009].
3. Создание базы цифровых карт в среде ГИС.

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Фонд "Инфосфера", Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, Троицк, Московская обл., Россия

<sup>6</sup>Джей-Джей групп, Москва, Россия

На первом этапе была сформирована база исходных данных по ГМПЗ и выполнены их проверка на полноту и качество, представление в соответствующем формате и структуре [Жалковский и др., 2009]. В состав базы данных входят данные: склонения, наклонения, северные, восточные и вертикальные составляющие, полные напряженности ГМПЗ. Исходной информацией для программы расчета значений поля были: координаты расчетной точки, высота над уровнем моря и дата расчета. На основании полученной информации был сформирован массив данных, содержащих опорные точки с информацией о составляющих геомагнитного поля. В исторический период наблюдений данные о ГМПЗ характеризовались разным качеством и собирались в процессе полевых наблюдений, в основном, в районах, представляющих практический прикладной интерес – например, на морских путях. В инструментальный период наблюдений сбор высокоточных данных осуществлялся магнитными обсерваториями (количество одновременно работающих обсерваторий менее 100), координаты которых распределены очень неравномерно. Представительность данных о магнитном поле Земли качественно изменилась с началом космической эпохи: появилась возможность измерять поле в точках, проекции на земную поверхность которых дают покрытие геоида с высокой плотностью. Таким образом, на втором этапе, при картографировании магнитных данных важной является задача пространственной и временной интерполяции данных. Основным методом принадлежит К.-Ф. Гауссу, он практически без изменений используется на протяжении полутора веков. До этого принципы интерполяции были эвристическими и с точки зрения современных представлений весьма неточными.

Модели ГМПЗ относятся к временным интервалам порядка дней–месяцев или нескольких лет, таким образом, речь идет о представлении некоторого усредненного значения поля, которое меняется достаточно медленно. В рамках этого усреднения с большой точностью выполняются так называемые условия магнитостатического приближения уравнений Максвелла в области, где нет свободных зарядов:

$$\nabla \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0$$

В рамках этого приближения вектор  $\mathbf{B}$  магнитного поля в этой области оказывается равным градиенту  $\nabla P$  некоторой вещественной функции  $P$ , определенной в той же области. Пространство от поверхности Земли и до ионосферы достаточно хорошо соответствует изолятору, поэтому ГМПЗ в этой области можно описывать при помощи этой вещественной функции  $P$ , которая называется скалярным потенциалом поля. Скалярный потенциал магнитного поля в силу уравнений Максвелла (в их магнитостатическом приближении) является гармонической функцией, то есть удовлетворяющей уравнению Лапласа:

$$\Delta P = 0$$

Задача интерполяции для векторных данных с учетом магнитостатического приближения и потенциального характера поля сводится к задаче интерполяции скалярной гармонической функции  $P$  – потенциала этого поля. Интерполяция скалярных функций, как правило, проводится с учетом специальных свойств этой функции, например, гармоническая функция в области определяется своими значениями на границе области. В применении к области вне поверхности Земли это означает, что измерив “усредненное по интервалу времени” магнитное поле на поверхности Земли (или на некоторой высоте над земной поверхностью), мы можем восстановить “усредненное по интервалу времени” поле всюду в этой области. Представление убывающей на бесконечности гармонической функции в области вне шара было предложено К.-Ф. Гауссом и состоит в продолжении на пространство значений на границе–сфере по сравнительно простым формулам. Точнее, на сфере гармоническая функция раскладывается в линейную комбинацию с постоянными коэффициентами некоторых базисных функций  $H_{mn}(\theta, \varphi)$ , зависящих от координат  $\theta, \varphi$  на сфере, а уже каждая такая функция (она называется сферической гармоникой) продолжается на любой радиус-вектор  $\mathbf{r}$  простым образом (здесь  $a$  обозначает радиус сферы):

$$H_{mn}(\theta, \varphi, r) = \left| \frac{r}{a} \right|^{m+1} H_{mn}(\theta, \varphi)$$

Таким образом, по наблюдениям за магнитным полем в интервале времени сначала восстанавливают вид разложения потенциала этого поля по сферическим на поверхности сферы, далее используют указанное продолжение. Подбор коэффициентов разложения ведется методом наименьших квадратов, точность которого существенно зависит от распределения точек на сфере.

Применительно к современным наблюдениям из космоса сферой считается поверхность, заметаемая траекториями спутника. Покрытие этой сферы точками наблюдения достаточно плотное, поэтому коэффициенты могут быть найдены с большой точностью. Полученные таким образом коэффициенты разложения ГМПЗ позволяют с высокой точностью картографировать векторное поле в любой точке земной поверхности. Эти модели усредненного поля называются IGRF-моделями Международного эталонного геомагнитного поля (МЭГП, International Geomagnetic Reference Field (IGRF)) Международной ассоциации по геомагнетизму и аэронауке (МАГА, International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)), а соответствующий набор коэффициентов – коэффициентами IGRF. Точность моделей и коэффициентов IGRF неоднократно проверялась прямыми измерениями в обсерваториях.

Ситуация радикально отличается при попытке нахождения значений исторического магнитного поля Земли: точки наблюдений распределены в высшей степени неравномерно, и поэтому коэффициенты моделей являются предметом обсуждения в научном сообществе. Известно несколько таких моделей на период с XVI в. до начала XX в.; мы использовали те из них, которые получили наибольшее признание в научной среде. На самом деле отличия в значениях моделируемого магнитного векто-

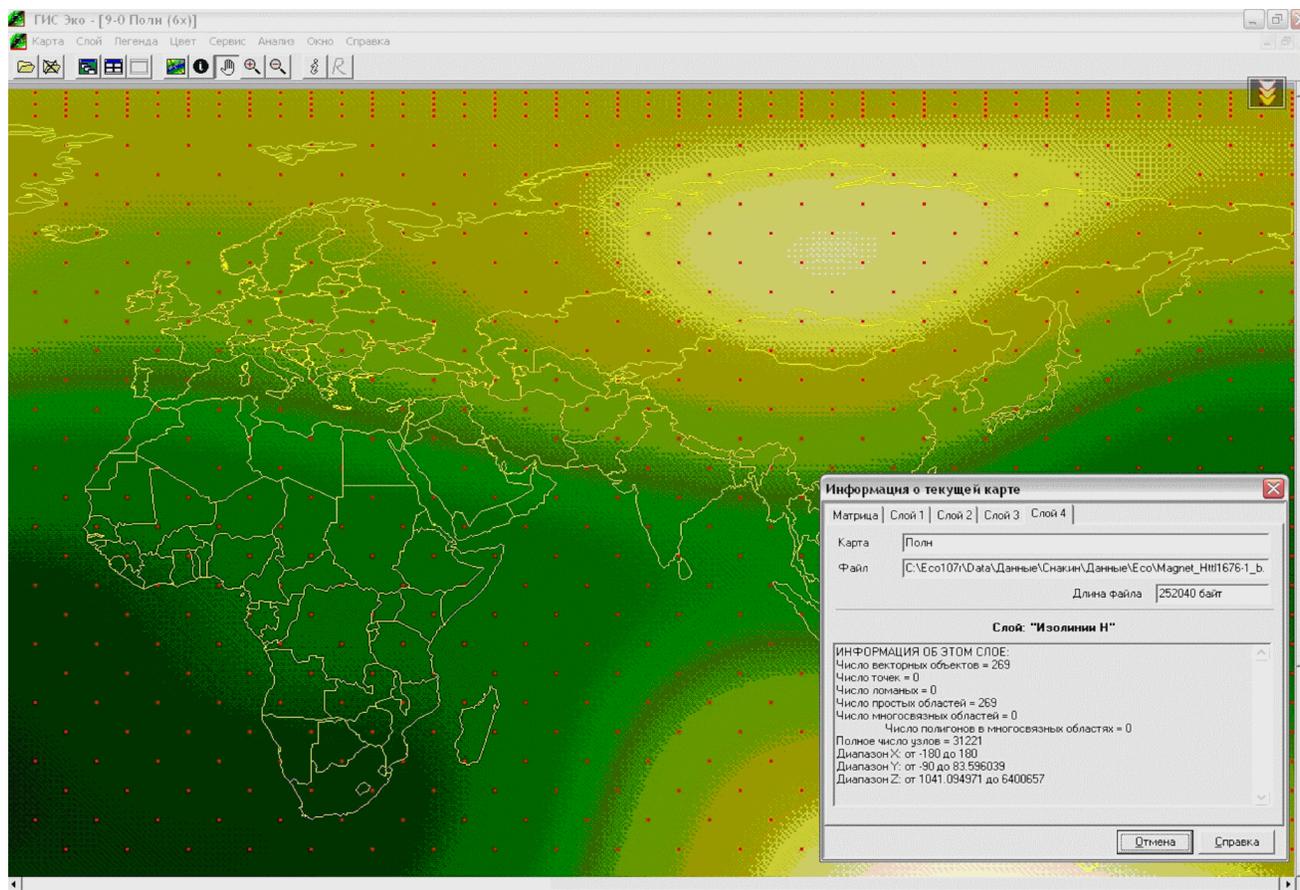


Рис. 1. Матрица значений характеристик ГМПЗ в среде ArcGIS.

ра по разным моделям исторического ГМПЗ не столь уж значительны, однако вопрос о точности каждой из них остается открытым.

Неточность модели, таким образом, проистекает как из неточности самих наблюдаемых данных (эту неточность можно связать с качеством использованных для наблюдений приборов), так и из способа выбора точек наблюдений. Разумеется, в исторические эпохи XVI–XVIII вв. основные наблюдения велись лишь вдоль торговых путей. Для систематизации этих наблюдений и проверки их на грубые ошибки группой исследователей Andrew Jackson, Art Jonkers, Matthew Walker была проведена огромная работа, результатами которой пользовались при составлении моделей на этот период все научные группы.

Помимо указанных трудностей, для нахождения коэффициентов ГМПЗ, в связи с неравномерностью точек наблюдения, имеется также принципиальная трудность, состоящая в том, что ранние наблюдения за магнитным полем состояли в изучении не всего магнитного вектора, но лишь его направления (это в лучшем случае – множество наблюдений связаны лишь с проекцией пространственного направления на касательную к точке геоида плоскость). В этих условиях очевидна неопределенность в выборе длины вектора поля, поэтому для построения моделей магнитного поля в исторический период при-

влекаются некоторые (впрочем, не вызвавшие особенных споров) гипотезы о суммарной энергии поля в различные интервалы исторического времени.

Собственно вычислительные методы, использовавшиеся для нахождения коэффициентов, имеют точность, намного превосходящую точность данных (это касается и моделей IGRF последнего времени) – вклад ошибки вычислений в неточность модели пренебрежимо мал.

Для восстановления вектора магнитного поля в точке земной поверхности и нанесения на карту его числовых характеристик необходимо использовать коэффициенты разложения магнитного потенциала и смоделировать значения всех сферических гармоник, входящих в разложение. Далее градиент потенциала, который является линейной комбинацией гармоник с постоянными коэффициентами, нужно найти, исходя из явных формул для дифференцирования сферических гармоник по их аргументам. Эта задача достаточно хорошо известна с вычислительной стороны, и разработка соответствующего алгоритма с дополнительной проверкой его относительно других подобных алгоритмов были выполнены в ГЦ РАН.

Для создания цифровых карт в среде ГИС использовались средства ПО ArcGIS 9.3 [Березко и др., 2009]. На Рис. 1 отображена матрица значений (красные точки) характеристик ГМПЗ в среде ArcGIS, которая в даль-

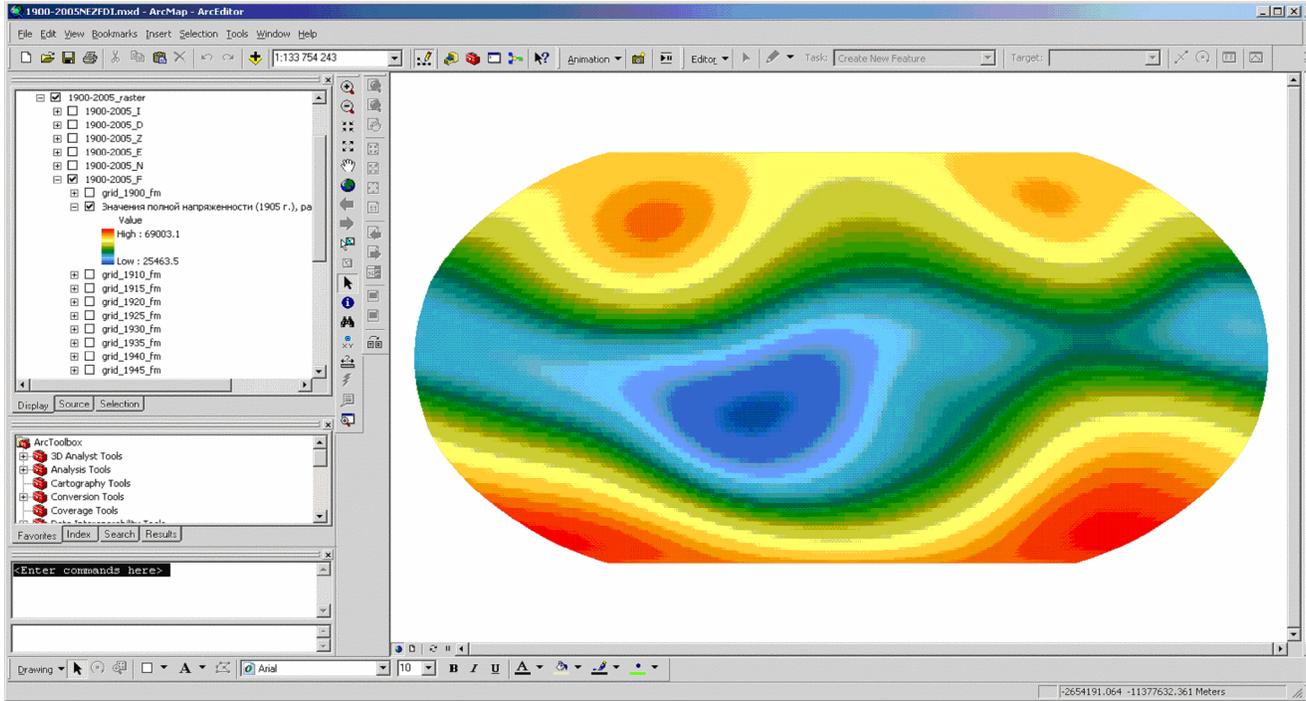


Рис. 2. Пример визуализации растровой карты изодинам модуля вектора напряженности ГМПЗ за 1905 г. в среде ArcGIS 9.3.

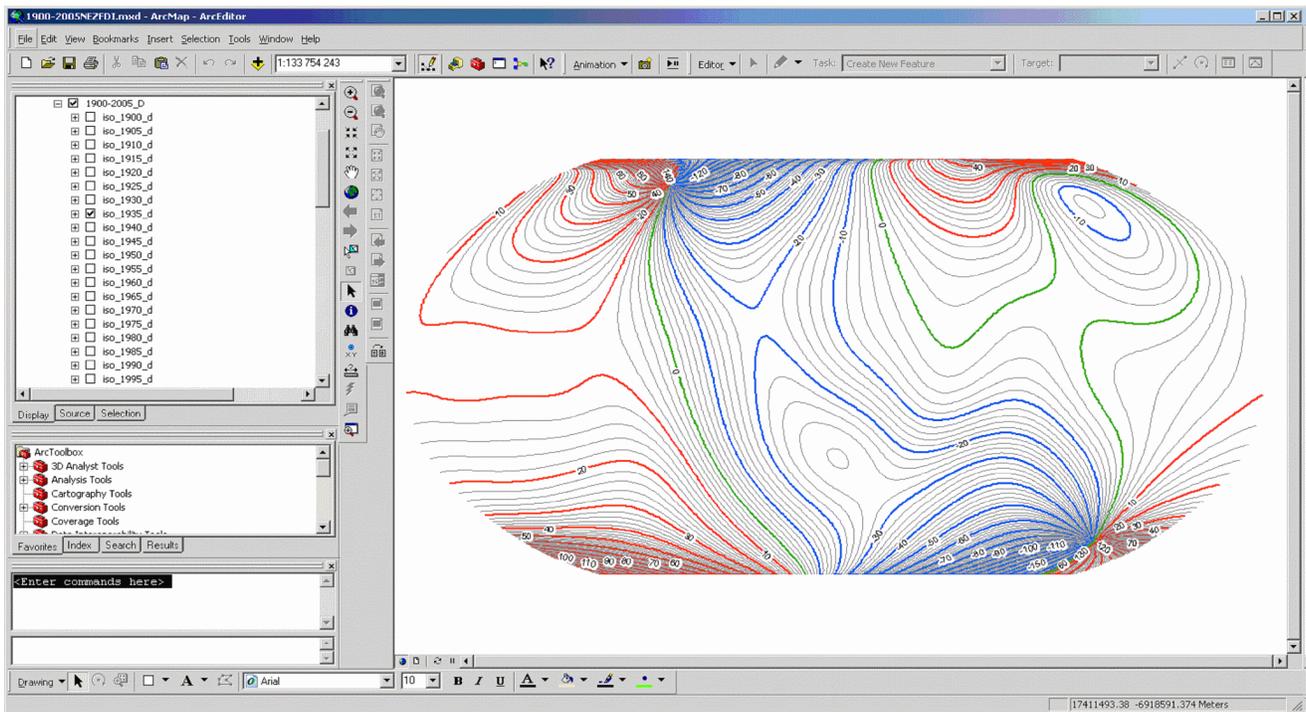


Рис. 3. Карта изогон ГМПЗ за 1935 г.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ГМПЗ

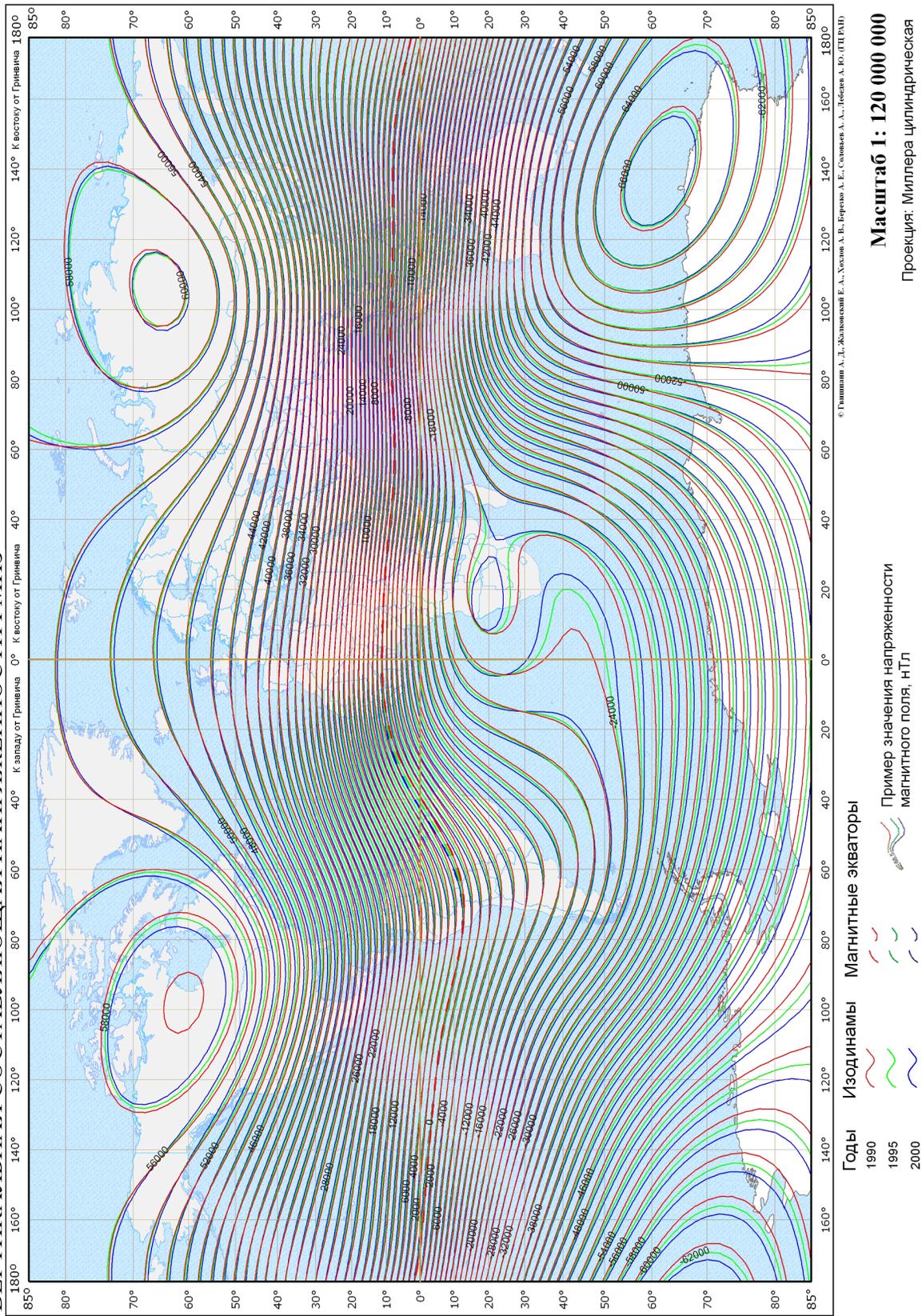


Рис. 4. Карты элементов ГМПЗ: (вверху) магнитное склонение эпох 1900, 1905 и 1910 гг.; (внизу) вертикальная составляющая напряженности эпох 1990, 1995 и 2000 гг.

нейшем использовалась для генерации соответствующей цифровой растровой карты элемента ГМПЗ.

Полученные матрицы значений в дальнейшем использовались для генерации соответствующих цифровых растровых карт компонент ГМПЗ. В результате были получены карты шести элементов ГМПЗ (магнитное склонение, магнитное наклонение, полная напряженность, северная, восточная и вертикальная составляющие напряженности) для магнитных эпох 1500–2005 гг. (Рис. 2).

На базе полученных растровых карт методом линейной интерполяции были сгенерированы цифровые карты изолиний соответствующих элементов ГМПЗ. Расчет производился средствами ПО ArcGIS 9.3. Шаг рассчитанных изодинам составляет 1 мкТл, к ним добавлены изодинамы с шагом 0.5 мкТл вблизи магнитных полюсов. Шаг рассчитанных изогон и изоклин составляет 2 градуса. Изодинамы полной напряженности, ее северной, восточной и вертикальной составляющих, изгоны магнитного склонения и изоклины магнитного наклонения ГМПЗ построены как непрерывные линии (Рис. 3).

В соответствии с требованиями “Общих редакционных указаний по составлению и подготовке к изданию карт Главного магнитного поля Земли” были выбраны масштаб, проекция, условные знаки и зарамочное оформление. На Рис. 4 приведен пример оформленных карт.

Была разработана технология редактирования, контроля качества и издания цифровых карт [Отчет, 2009]. Например, при оценке качества карт проводился контроль следующих параметров:

1. Рамки: размеры, толщина линий.
2. Толщина, гладкость, правильность разрывов линий: изолиний компонент Главного магнитного поля Земли, магнитных меридианов, магнитного экватора.
3. Условные знаки.
4. Содержание и размещение легенды.
5. Зарамочное оформление: полнота содержания, размещение и шрифты.
6. Красочное оформление тематической информации.
7. Красочное оформление географической основы и ее содержание.
8. Контроль точности содержания тематического параметра карты по координатам.

По результатам оценки составлялось заключение о качестве карты; результаты оценки заносились в ее формуляр. На третьем этапе была сформирована база цифровых карт в среде ArcGIS 9.3 со всеми особенностями и атрибутами, необходимыми для удобства пользования Атласом.

## 1 Литература

- Березко, А. Е., А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, Е. А. Жалковский, Р. И. Красноперов, С. А. Смагин, Э. С. Болотский (2008), Интеллектуальная географическая информационная система “Данные наук о Земле по территории России”, *Инженерная экология*, 5, 32–40.
- Березко, А. Е., А. А. Соловьев, Р. И. Красноперов, А. И. Рыбкина, Э. О. Кедров, Э. С. Болотский (2009), Интеллектуальная аналитическая геоинформационная система “Данные наук о Земле на территории России”, *Международная конференция “Итоги электронного геофизического года (2009) под ред. В. А. Нечитайленко*, 117, ГЦ РАН, Москва.
- Жалковский, Е. А., Т. Н. Бондарь, В. П. Головков, А. В. Хохлов, В. И. Никифоров, А. Е. Березко, А. А. Соловьев, Э. С. Болотский (2009), Исходные данные Атласа Главного магнитного поля Земли, *Международная конференция “Итоги электронного геофизического года (2009) под ред. В. А. Нечитайленко*, 117, ГЦ РАН, Москва.
- Отчет, (2009), Создание карт магнитных эпох 1940–2005 гг., *Отчет о научно-исследовательской работе “Разработка Атласа Главного магнитного поля Земли” (промежуточный)*, Этап N 2, ИПГ, Москва.

---

А. Е. Березко, Е. А. Жалковский, А. М. Мерзлый, О. В. Никифоров и А. А. Соловьев, Геофизический центр РАН, ул. Молодежная 3, 119296 Москва, Россия. (a.berezko@gcras.ru)

Т. Н. Бондарь и В. П. Головков, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, 42190, Троицк, Московская обл., Россия

Е. Е. Жалковский, Джей-Джей групп, Москва, Россия  
Г. Ф. Митенко, В. В. Снакин, В. Р. Хрисанов и П. А. Шарый, Фонд “Инфосфера”, Москва, Россия

В. И. Никифоров, Институт физики Земли РАН, ул. Б. Грузинская 10, Москва 123995, Россия

А. В. Хохлов, МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 119991 Москва, Россия