

Интерполяция данных обсерваторских измерений и визуализация полной напряженности магнитного поля Земли

А. И. Рыбкина¹, А. А. Соловьев¹, А. И. Каган¹, А. А. Шibaева¹, О. О. Пятыхина¹ и О. В. Никифоров¹

Получено 28 января 2013 г.; опубликовано 17 марта 2013 г.

Разработана методика и программное средство представления данных по геомагнитной активности. Созданная непрерывно обновляемая база цифровых данных по геомагнитной активности за счет программного модуля, реализующего геоданные в среде геоинформационной системы (ГИС) путем преобразования цифровых значений в данные с картографической привязкой, визуализируется в режиме квазиреального времени. Разработан прототип программного средства представления данных по оценке геомагнитной активности на многофункциональном демонстрационном комплексе со сферическим экраном в режиме квазиреального времени. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Магнитное поле Земли; ГМПЗ; реальное время; квазиреальное время; пространственные данные; обсерватории; ИНТЕРМАГНЕТ; сферический экран; визуализация данных.

Ссылка: Рыбкина, А. И., А. А. Соловьев, А. И. Каган, А. А. Шibaева, О. О. Пятыхина и О. В. Никифоров (2013), Интерполяция данных обсерваторских измерений и визуализация полной напряженности магнитного поля Земли, *Вестник ОНЗ РАН*, 5, NZ3002, doi:10.2205/2013NZ000116.

Введение

В Геофизическом центре Российской академии наук (ГЦ РАН) накоплен большой опыт применения современных компьютерных технологий и методов искусственного интеллекта для обработки, визуализации, организации хранения и распространения больших объемов геолого-геофизической информации. При решении этой задачи особая роль отводится созданию баз и банков данных. Основным недостатком таких баз данных и картографических изданий, выпущенных в форме традиционных бумажных карт, атласов и учебников, является их малая визуальная репрезентативность и ограниченные возможности в представлении динамических явлений.

Одной из важнейших задач, выполняемых в ГЦ РАН, является исследование магнитного поля Земли и оценка его активности. Целью проекта “Разработка методики и программного средства представления данных по оценке геомагнитной активности на многофункциональном программно-аппаратном демонстрационном комплексе со сферическим экраном в режиме реального или квазиреального времени” было не только создание непрерывно обновляемой базы цифровых данных по геомагнитной

активности, но и разработка программного обеспечения для визуализации этих данных в режиме квазиреального времени.

Современные средства визуализации (программные и технические) не только позволяют лучше представить предмет и результаты исследования, но и облегчают умозрительный анализ и осмысление этих результатов. Разработанные в последние годы сферические дисплеи (диаметром от 30 см до 5 м) представляют особый интерес для наук о Земле, так как позволяют визуализировать различные исследуемые геофизические поля в их естественной системе координат. (см. проект “Science On a Sphere” Национального управления по исследованию атмосферы и океана США http://sos.noaa.gov/What_is_SOS/index.html).

Постановка задачи

Для решения поставленных задач в рамках упомянутого выше проекта были определены основные этапы работ:

1. Создание базы данных по геомагнитной активности, регистрируемых в режиме реального времени станциями мировой сети наблюдения ИНТЕРМАГНЕТ.
2. Разработка программного компонента на ос-

¹Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

нове технологий геоинформационных систем (ГИС-технологий), решающего задачу оперативно-го представления данных геомагнитной активности, поступающих в режиме реального времени.

3. Разработка методики и создание прототипа программного средства, позволяющего преобразовывать плоские картографические изображения в набор цифровых сферических слоев, для их последующей демонстрации и анализа в режиме реального (квазиреального) времени на многофункциональном программно-аппаратном демонстрационном комплексе со сферическим экраном.

Поставленные задачи включают в себя как решение научных задач по анализу геомагнитной активности на территории России, так и научно-прикладные разработки по визуализации полученных результатов на сферическом комплексе.

Программно-аппаратный демонстрационный комплекс уже эффективно использован в ГЦ РАН при решении следующих задач:

1. Построение геофизических моделей.
2. Комплексный анализ данных, реализованных в виде интеллектуальных ГИС методами дискретного математического анализа (ДМА).
3. Наглядная оценка решения обратных задач геофизики путем перебора прямых задач при изучении и разработка новых методов нахождения оптимальных решений при построении геодинамических моделей.
4. Долгосрочный прогноз сильных и сильнейших землетрясений.
5. Реконструкция и анализ исторической динамики развития главного магнитного поля Земли (ГМПЗ).
6. Построение современных моделей магнитного поля Земли на основе мониторинга геомагнитной активности, регистрируемой станциями мировой сети наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ.
7. Помощь в принятии управленческих и организационных решений при реализации различных фундаментальных и научно-практических проектов и программ.

Для создания непрерывно обновляемой базы цифровых данных по геомагнитной активности на семи обсерваториях в пределах территории России ведутся непрерывные измерения параметров магнитного поля Земли. В частности, измеряется полная напряженность магнитного поля Земли F . Данные из обсерваторий поступают в Российско-украинский центр геомагнитных данных, функционирующий на базе ГЦ РАН. Была поставлена задача реализации программного комплекса, производящего интерполяцию полной напряженности поля F по мере поступления данных из российских обсерваторий с последующей генерацией набора карт распределения интерполированных величин по территории России.

Программный комплекс для интерполяции полной напряженности МПЗ

Полная напряженность поля в данной точке определяется несколькими факторами, которые зависят от времени существенно различным образом: главным магнитным полем Земли с источниками в жидком ядре Земли, литосферным полем с источниками в земной коре, ионосферными источниками и локальными техногенными источниками [Соловьев и др., 2012]. При этом последний фактор при наблюдениях стараются минимизировать, поэтому им можно в данной работе пренебречь. Главное магнитное поле Земли значимо (в пределах доступной точности) изменяется на масштабах порядка года, а литосферное поле – на масштабах геологических времен, поэтому в вопросах интерполяции магнитного поля на масштабе дней и месяцев их следует рассматривать как постоянные векторные слагаемые. Соответствующие данные по напряженности несложно восстанавливаются из векторных данных, при этом вклад в напряженность ГМПЗ является основным. Соответствующие данные существуют благодаря сбору геологической информации (магнитная съемка местности в масштабе региона) и спутниковым магнитным измерениям. Последние, к сожалению, не всегда ведутся непрерывно, но, учитывая малую изменчивость ГМПЗ во времени, использование старых моделей ГМПЗ не должно приводить к существенным неточностям. Оставшаяся компонента, которая называется дневной вариацией, напротив, меняется значимо, и тем самым интерполяция ее значений в пространстве и во времени является ключевой для интерполяции магнитных наблюдений вообще.

Существуют несколько серьезных проблем, связанных с интерполяцией магнитного поля. Данные по перечисленным выше факторам, как правило, не являются векторными. Тем самым, результирующая напряженность поля, вообще говоря, не является суммой напряженностей от главного и литосферного, а также его дневной вариации, в то время как в векторном смысле эти факторы суть обычные слагаемые. Однако, при отсутствии лучших возможностей приходится считать, что на фоне ГМПЗ остальные слагаемые невелики и разница между напряженностью истинного поля и суммой напряженностей служит допустимо хорошим приближением к ответу. Разумеется, возможна выборочная (там, где данные доступны в векторном виде) проверка этого допущения. Следующая трудность состоит в чрезвычайно нерегулярном расположении обсерваторий и необходимостью интерполяции по пространству – на таких пространственных масштабах поправки на кривизну значимо влияют на ответ. Выбор типа интерполяции с точек наблюдения на регулярную сетку определяется тем, что на фоне указанных выше соглашений простая линейная интерполяция ничем не хуже сплайнов.

Метод перенесения значений с нерегулярной плоской сетки с вершинами в точках наблюдений на регулярную основан на триангуляции пространства и предположении о том, что в каждом треугольнике значение искомой ве-

личины есть линейная функция. Иными словами, значение в каждой внутренней точке треугольника целиком определяется расстояниями (взятыми с учетом кривизны) до его вершин (точек нерегулярной сетки, где имеются наблюдения).

Собственно триангуляций с вершинами в данных точках может быть несколько, общепринято выбирать те из них, где треугольники по возможности близки к равносторонним. Известен алгоритм построения такой триангуляции, называемый триангуляцией Делоне [Скворцов, 2002]. Дальнейшее применение метода очевидно: исходные точки соединяются таким образом, чтобы результирующая поверхность была покрыта “лоскутным одеялом” из треугольников. При этом грани треугольников не должны пересекаться между собой. Каждый треугольник определяется тремя исходными экспериментальными точками. Значения функции в узлах регулярной сетки, попадающих внутрь этого треугольника, принадлежат плоскости, проходящей через вершины треугольника. Отличительной чертой триангуляции Делоне является минимизация вытянутых треугольников. К недостаткам метода триангуляции Делоне можно отнести то обстоятельство, что он может интерполировать только точки, находящиеся внутри выпуклой оболочки, содержащей в себе все эти точки (т.е. наименьшее выпуклое множество, содержащее все эти точки).

В качестве источника данных использовалась база данных, содержащая измерения напряженности магнитного поля по всем обсерваториям, участвующим в проекте. На первом этапе была написана программа на внутреннем языке системы MATLAB, считывающая в реальном времени значения напряженности магнитного поля Земли F из базы данных. Программа усредняет значение поля F за час. Таким образом, мы имеем среднее значение $F_{\text{и}}$ (измеренное) за каждый час по каждой из обсерваторий. После этого, с привлечением модели главного магнитного поля Земли IGRF ([Macmillan and Maus, 2005], <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>), из полученных средних значений вычитаются среднегодовые модельные значения поля $F_{\text{м}}$ (модельное) для точек, где находятся обсерватории. Следующая программа, также написанная в системе MATLAB, по значениям этой разницы ($F_{\text{и}} - F_{\text{м}}$) производит триангуляцию Делоне с последующей линейной интерполяцией на регулярную сетку и строит рисунок получившегося поля с разрешением 4096×2048 . Триангуляция Делоне производится алгоритмом из математической библиотеки MATLAB. Таким образом, в результате работы программы в узлах регулярной сетки мы имеем значения отклонений наблюдаемого поля от нормального. Для перехода от отклонений к абсолютным значениям полной напряженности поля необходимо в каждой точке сетки к получившемуся значению прибавить вычисленное для конкретной точки значение нормального поля согласно модели IGRF.

Разработанный программный комплекс был установлен на один из серверов Российско-украинского геомагнитного центра данных в ГЦ РАН [Soloviev et al., 2012]. Основными функциями сервера являются хранение базы геомагнитных данных и обработка поступающих данных алгоритмами, разрабатываемыми в ГЦ РАН [Богомуд-

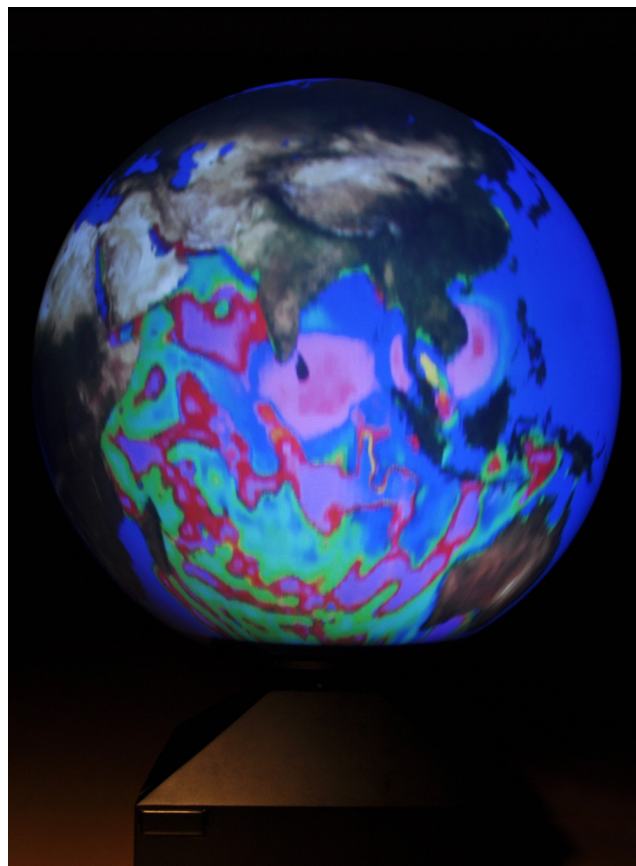


Рис. 1. Цифровой демонстрационный комплекс со сферическим проекционным экраном в работе.

нов и др., 2010]. Программный комплекс функционирует непрерывно, генерируя карты с шагом в 1 час по мере поступления новых геомагнитных данных (Рис. 1). Для его функционирования на сервере установлено следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Linux Ubuntu 12.04;
2. СУБД MySQL Server 5.5;
3. Octave 3.2.4;
4. MATLAB 2011.

Обращение модулей MATLAB к базе геомагнитных данных происходит посредством веб-сервисов, разработанных для обеспечения доступа к данным геомагнитного центра через веб. Те сервисы, которые задействованы в работе разработанного программного комплекса, позволяют осуществлять многокритериальный запрос к БД, возвращая данные в табличном виде. Все веб-сервисы установлены на отдельном веб-сервере, доступном пользователям через Интернет.

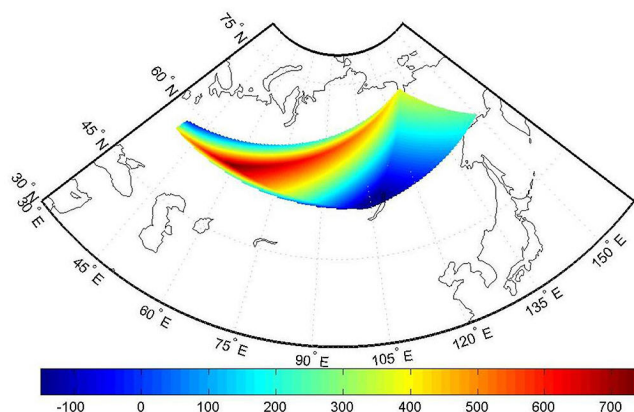


Рис. 2. Интерполяция данных обсерваторских измерений полной напряженности магнитного поля Земли 04.09.2012, 05:00.

Аппаратура

Используемый в работах по проекту цифровой демонстрационный комплекс является средством визуализации нового поколения. Он состоит из сферического экрана, цифрового мультимедийного проектора, установленного в металлическом корпусе, оптической зеркально-линзовой системы, состоящей из блока линз и зеркала, и рабочей станции со специализированным программным обеспечением. Сферический экран представляет собой жесткую полую сферу из акрилового полимера диаметром 61 см. Внутри сфера покрыта специальным напылением для проекционных экранов, а снаружи имеет антибликовое покрытие. Сфера устанавливается сверху на блок линз, снабженный сверхширокоугольной линзой с переменным фокусным расстоянием. Блок линз монтируется в общем металлическом корпусе вместе с зеркалом и проектором. Металлическое зеркало с высоким коэффициентом отражения, установленное под углом 45° к оптической оси проектора, отклоняет лучи на 90° и направляет их в блок линз.

Демонстрационный комплекс подключается к рабочей станции, на которой установлено специализированное программное обеспечение. Оно позволяет преобразовать любое изображение прямоугольного формата с соотношением сторон 2 : 1 в 3-D изображение на сфере. Программное обеспечение позволяет визуализировать растровые изображения и видео, полностью контролируя процесс демонстрации с помощью пульта дистанционного управления (Рис. 2). Имеется возможность запускать и останавливать анимацию; вращать, переворачивать, наклонять и разворачивать изображение в любых направлениях.

Для взаимодействия базы данных со сферическим экраном на его рабочую станцию была установлена программная утилита, которая обеспечивает периодический перезапуск программы цифрового демонстрационного комплекса (Рис. 3). Таким образом, на сферическом экране постоянно отображаются актуальные данные о геомагнитной обстановке.

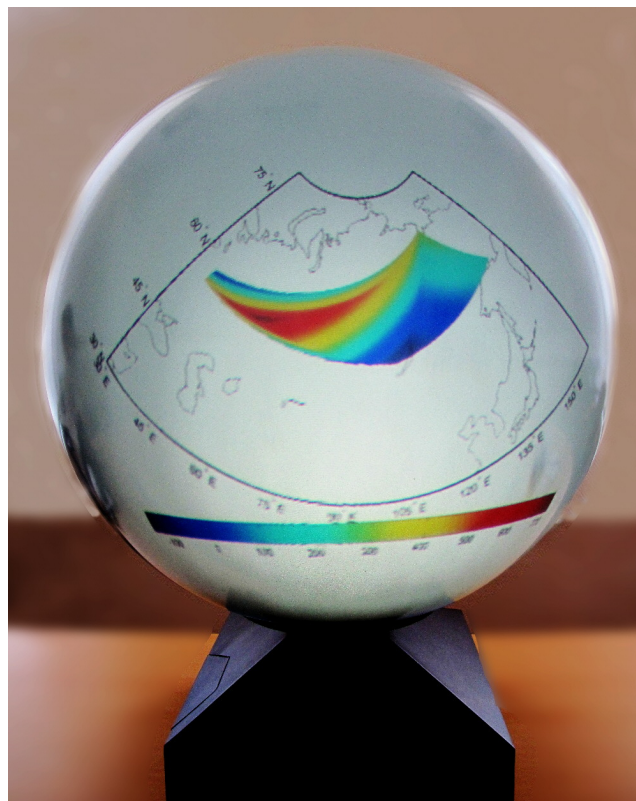


Рис. 3. Пример визуализации результатов интерполяции на сферическом экране.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ проекта 12-01-31396 мол_а “Разработка методики и программного средства представления данных по оценке геомагнитной активности на многофункциональном программно-аппаратном демонстрационном комплексе со сферическим экраном в режиме реального или квазиреального времени”. Авторы благодарят О. В. Александову за помощь в редакционно-технической подготовке статьи.

Литература

- Богоутдинов, Ш. Р., А. Д. Гвишиани, С. М. Агаян, А. А. Соловьев, Э. Кин (2010), Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. I. Выбросы на магнитограммах всемирной сети ИНТЕРМАГНЕТ, *Физика Земли*, 11, 99–112.
- Скворцов, А. В. (2002), *Триангуляция Делоне и ее применение*, изд-во Томского университета, Томск, 128.
- Соловьев, А. А., и др. (2012), *Атлас магнитного поля Земли (под редакцией А. Д. Гвишиани, А. В. Фролова, В. Б. Лапшина)*, doi:10.2205/2012Atlas_MPZ.
- Macmillan, S., and S. Maus (2005), International Geomagnetic Reference Field – the tenth generation, *Earth Planets Space*, 57, 1135–1140.
- Soloviev, A., A. Gvishiani, Y. Sumaruk, V. Starostenko (2012), Russian-Ukrainian Geomagnetic Data Center, *23rd CODATA International Conference “Open Data and Information for a Changing Planet”, 28–31 October 2012, Taipei, Taiwan*.

А. И. Каган, О. В. Никифоров, О. О. Пятыгина, А. И. Рыбкина, А. А. Соловьев, А. А. Шибаева, Геофизический центр РАН, Москва 119296, ул. Молодежная, д. 3. (a.rybkina@gcras.ru)