Автоматизированный расчет квази-окончательных данных

А. А. Соловьев, Д. В. Кудин, Р. В. Сидоров

Геофизический центр Российской академии наук

Москва – 2015

1. Общая схема подготовки квази-окончательных данных

Квази-окончательные (верифицированные) данные представляют собой векторные измерения поля, скорректированные с учетом временных базисных значений непосредственно после регистрации, очень близкие по значениям к окончательным обсерваторским данным. На сегодняшний день лишь 33 обсерватории из 140 во всем мире способны производить удовлетворительные квази-окончательные данные, расходящиеся с окончательными менее чем на 5 нТл. Ценность квази-окончательных данных крайне велика, поскольку задержка в их расчете по регламенту не превышает 3 месяцев (по факту не превышает 1 месяца), в то время как окончательные данные становятся доступными с задержкой больше года. Квази-окончательные данные наиболее востребованы в таких важнейших задачах геомагнетизма, как оперативное моделирование главного магнитного поля Земли и расчет индексов геомагнитной активности [Peltier and Chulliat, 2010].

Расчет квази-окончательных данных состоит из двух основных этапов:

- обработка непрерывных векторных измерений магнитного поля, распознавание и удаление сбоев (техногенных аномалий) на магнитограммах и контроль качества;
- определение базисных значений по результатам абсолютных наблюдений и расчет по ним временных рядов полных значений элементов поля.

В случае наличия дублирующего вариометра распознанные техногенные аномалии заменяются на фрагменты корректно зарегистрированных данных, в случае отсутствия – удаляются. Как правило, рутинная оценка качества измерений осуществляется операторами обсерваторий вручную. Распространенным способом детектирования спайков на исходной записи является анализ разностей между значениями модуля вектора, измеренными непосредственно скалярным магнитометром и рассчитанными по векторным измерениям после их корректировки с использованием принятых базисных значений [Clarke et al., 2013;

Соловьев и Кудин, 2015а]. Однако и такая запись может содержать ложные выбросы, а может и не содержать в себе искомых. Первая ситуация может быть обусловлена асинхронной регистрацией двумя приборами или разными методами усреднения измерений. Причиной второй ситуации может быть кратковременный поворот вектора магнитного поля в точке установки вариометра без изменения его модуля или сильное влияние на поле, зафиксированное обоими магнитометрами. В случае Центра геомагнитных данных процедура распознавания техногенных выбросов во многом автоматизирована.

Пересчет базисных значений и последующий пересчет квази-окончательных данных также происходит автоматически каждый раз при поступлении новых результатов абсолютных наблюдений. Соответствующий алгоритм выглядит следующим образом. Сначала происходит расчет абсолютных значений магнитного поля за моменты времени проведения абсолютных измерений – магнитного склонения D_{abs}, наклонения I_{abs} и полной напряженности F_{abs}. По ним вычисляются также горизонтальная и вертикальная компоненты H_{abs} и Z_{abs}:

$$H_{abs} = F_{abs}\cos\left(I_{abs}\right), \tag{1}$$

$$Z_{abs} = F_{abs}\sin\left(I_{abs}\right).$$

Абсолютные измерения производятся на обсерватории в «абсолютном» павильоне примерно 1-2 раза в неделю при помощи одноосевого феррозондового магнитометра, установленного на немагнитном теодолите (деклинометр/инклинометр), и скалярного магнитометра. Абсолютные значения магнитного поля определяются в географических координатах установки деклинометра/инклинометра [Jankowski and Sucksdorff, 1996]. Расчет абсолютных значений зависит от метода абсолютных наблюдений – нуль-метода или офсетного метода. Далее из базы геомагнитных данных считываются вариационные данные, соответствующие моментам измерений. Также из базы происходит считывание информации об ориентации векторного магнитометра. После чего происходит расчет базисных значений. В случае ориентации магнитометра в магнитной системе координат (*HDZ*) рассчитываются базисные значения H_0, D_0 и Z_0, в случае ориентации в географической системе координат (*XYZ*) – значения X_0, Y_0 и Z_0. Впоследствии формируется SQL-запрос к БД и результаты расчета абсолютных и базисных значений и их временна́я привязка импортируются в базу данных.

Базисные значения представляют собой нерегулярный временной ряд. Для пересчета регулярных вариаций компонент в полные значения элементов поля требуется регуляризация базисных значений. Обычно для аппроксимации значений используется

метод сглаживающего сплайна. При построении аппроксимации учитываются такие сбои, как выбросы и скачки. Далее происходит расчет полных значений компонент поля с использованием базисных кривых и вариационных значений. Результаты расчета абсолютных и базисных значений, базисных кривых, а также квази-окончательных данных сохраняются в отдельном разделе базы геомагнитных данных.

2. Расчет абсолютных значений

В данном разделе остановимся на описании процедуры расчета абсолютных значений для случая офсетного метода проведения абсолютных измерений. Офсетный метод заключается в измерении погрешностей при восьми положениях немагнитного теодолита деклинометра/инклинометра, перпендикулярных вектору магнитного поля. При измерении склонения D эти положения находятся в горизонтальной плоскости, и они перпендикулярны горизонтальной компоненте H:

1. сенсор сверху, теодолит направлен на восток;
2. сенсор снизу, теодолит направлен на запад;
3. сенсор снизу, теодолит направлен на восток;
4. сенсор сверху, теодолит направлен на запад.

При измерении наклонения I положения находятся в вертикальной плоскости, и они перпендикулярны полному вектору F:

5. сенсор сверху, теодолит направлен на север;
6. сенсор снизу, теодолит направлен на юг;
7. сенсор снизу, теодолит направлен на север;
8. сенсор сверху, теодолит направлен на юг.

Наблюдателем находится положение теодолита 1, близкое к перпендикуляру компоненте H. Далее положения 2-4 последовательно устанавливаются путем вращения теодолита на 180^o либо в вертикальной, либо в горизонтальной плоскостях. Аналогично происходит в случае положений 5-8 для измерения I. При каждом из положений регистрируются значения с датчика магнитометра $M(i)$, i=1,…,8. Они представляют собой значения проекции вектора на ось сенсора магнитометра. Эти значения, как правило, малы, поскольку сенсор во всех положениях почти перпендикулярен вектору. Введем следующие обозначения:

A_{ref} – азимут визирной цели (миры), заранее определенный на обсерватории с высокой точностью;

A_{mark} – угол в шкале теодолита в горизонтальной плоскости, соответствующий азимуту миры;

PDD – угол в шкале теодолита в горизонтальной плоскости, при котором начинается измерение склонения *D*, т.е. соответствует положению 1;

PDI – угол в шкале теодолита в вертикальной плоскости, при котором начинается измерение наклонения *I*, т.е. соответствует положению 5. При этом угол в горизонтальной плоскости выставляется на *PDD*-90^o;

$F_{abs}(i)$ – абсолютное значение *F*, полученное на абсолютном пилларе в момент *i*-го измерения, i=1,…,8;

PDDerr(*i*), i=1,…,4 – угол в шкале теодолита, недостающий до перпендикулярности теодолита компоненте *H* при измерении *D* в положениях 1,…,4;

PDIerr(*i*), i=1,…,4 – угол в шкале теодолита, недостающий до перпендикулярности теодолита вектору *F* при измерении *I* в положениях 5,…,8.

Сначала вычисляются *PDIerr*(*i*) по формулам:

$$PDIerr(i) = \arcsin\left(\frac{M(j)}{F_{abs}(j)}\right), i = 1,...,4,\ j = 5,...,8.$$

Поскольку в теодолите углы в вертикальной плоскости отсчитываются от зенита, для *I* имеем среднюю ошибку в виде:

$$\overline{PDIerr} = \frac{-PDIerr(1) + PDIerr(2) - PDIerr(3) + PDIerr(4)}{4}.$$

Смена знаков в числителе компенсирует тот факт, что при перевороте сенсора через зенит в вертикальной плоскости, или при повороте сенсора на 180^o в горизонтальной плоскости происходит смена знака в показаниях датчика магнитометра.

Таким образом, окончательная формула для I_{abs}:

$$I_{abs} = PDI + \overline{PDIerr}.$$

Для *D* средняя ошибка рассчитывается с использованием полученного I_{abs}. Сначала вычисляются *PDDerr*(*i*):

$$PDDerr(i) = \arcsin\left(\frac{M(i)}{H_{abs}(i)}\right), i = 1,...,4,$$

где

$H_{abs}(i)$ – абсолютное значение *H* в момент *i*-го измерения (i=1,…,4), рассчитанное как

$$H_{abs}(i) = F_{abs}(i)\cos(I_{abs}).$$

Таким образом, в случае *D* средняя ошибка будет

$$\overline{PDDerr} = \frac{PDDerr(1) - PDDerr(2) + PDDerr(3) - PDDerr(4)}{4},$$

а D_{abs} будет рассчитываться по формуле:

$$D_{abs} = PDD + \overline{PDDerr} - 90^0 + A_{ref} - A_{mark}\,.$$

В данной формуле

$(PDD + \overline{PDDerr})$ отражает искомый угол, перпендикулярный к H в шкале теодолита,

$(PDD + \overline{PDDerr} - 90^0)$ – угол в шкале теодолита, соответствующий направлению H,

$(A_{ref} - A_{mark})$ – разница между известным азимутом и соответствующим показанием теодолита в горизонтальной плоскости, которая используется для приведения шкалы теодолита к шкале реальных углов в горизонтальной плоскости.

Полученному значению D_{abs} присваивается среднее время T_D измерений $M(i)$ в положениях i=1,…,4, а полученному значению I_{abs} присваивается среднее время T_I измерений $M(i)$ в положениях i=5,…,8.

3. Расчет базисных значений и их временная привязка

В измерениях, полученных феррозондовыми векторными магнитометрами, иногда наблюдается дрейф, обусловленный температурными вариациями, старением прибора и другими причинами. Для периодической калибровки векторного магнитометра и компенсации возможного наклона постамента, на котором установлен магнитометр, регулярно производятся абсолютные измерения компонент вектора магнитного поля. Полученные абсолютные значения используются для расчета значений калибровочной кривой, которые называются базисными значениями.

Как отмечалось ранее, расчет базисных значений зависит от ориентации вариометра. Сначала рассмотрим более сложный случай, когда вариометр установлен в системе магнитных координат (*HDZ*). В этом случае северное направление магнитометра приближено к направлению на магнитный полюс. При этом датчик северной компоненты вариометра измеряет относительное приращение dH всей горизонтальной составляющей. Датчик восточной компоненты, ориентированный в горизонтальной плоскости перпендикулярно магнитному меридиану, измеряет угловую величину δD, либо величину dD в нанотеслах (рис. 1). Величину, определяемую датчиком вертикальной компоненты, обозначим dZ. dH, δD (dD) и dZ являются непрерывными измерениями вариаций составляющих поля векторным магнитометром, dF – непрерывными измерениями полной напряженности поля скалярным магнитометром.

Рис. 1. Ориентация векторного магнитометра относительно географической системы координат в горизонтальной плоскости. *dH* и *dD* – непрерывные измерения вариаций горизонтальных компонент (северной и восточной) векторным магнитометром. Пунктиром показано направление абсолютного значения полной напряженности магнитного поля в горизонтальной плоскости (H_{abs}).

Для установления взаимосвязи между векторными измерениями и абсолютными значениями вводятся следующие формулы [Rasson, 2005]:

$$H_{abs} = \sqrt{(H_0 + dH)^2 + dD^2}\ , \tag{2}$$

$$D_{abs} = D_0 + \arcsin\left(\frac{dD}{H_{abs}}\right) = D_0 + \arctan\left(\frac{dD}{H_0 + dH}\right) = D_0 + \arctan\left(\frac{dD}{\sqrt{H_{abs}{}^2 - dD^2}}\right), \tag{3}$$

$$Z_{abs} = Z_0 + dZ\ , \tag{4}$$

$$F_{abs} = F_0 + dF\ ,\ F_0 = const. \tag{5}$$

При этом,

$$\arcsin\left(\frac{dD}{H_{abs}}\right) = \delta D\ . \tag{6}$$

По данным формулам вычисляются базисные значения H_0 (нТл), D_0 (градусы), Z_0 (нТл) и F_0 (нТл) для горизонтальной компоненты, склонения, вертикальной компоненты и полной напряженности поля соответственно. Эти значения соответствуют полученным абсолютным измерениям D_{abs} , I_{abs} и F_{abs} и вычисленным по ним H_{abs} и Z_{abs}. Выбор формулы для расчета H_0 (2) и D_0 (3) зависит от того, какую величину измеряет вариометр – δD или *dD* (6).

Согласно формулам (2) и (3), для расчета H_0 и D_0 требуется значение H_{abs}. Поскольку H_{abs} рассчитывается через I_{abs} (1), то H_{abs} присваивается также время T_I. Для расчета H_0 (2) из данных вариометра берутся значения $\overline{dH(T_I)}$ и $\overline{dD(T_I)}$. Они представляют собой средние значения за времена измерений $M(i)$ (предыдущий подраздел) в положениях деклинометра/инклинометра $i = 5,...,8$:

$$\overline{dH(T_I)} = \frac{(dH(t_5) + dH(t_6) + dH(t_7) + dH(t_8))}{4}, \quad (7)$$

$$\overline{dD(T_I)} = \frac{(dD(t_5) + dD(t_6) + dD(t_7) + dD(t_8))}{4}. \quad (8)$$

Таким образом, эти компоненты вариометра привязаны к временной отметке T_I, аналогично F_{abs} и H_{abs}. Отсюда имеем окончательную формулу для расчета H_0:

$$H_0 = \sqrt{H^2{}_{abs} - \overline{(dD(T_I))^2}} - \overline{dH(T_I)}. \quad (9)$$

Тем самым, H_0 также присваивается время T_I.

Так как Z_{abs} тоже однозначно определяется через I_{abs}, базисному значению Z_0 также присваивается время T_I. Для расчета Z_0 берутся средние значения $\overline{dZ(T_I)}$, вычисляемые за времена измерений $M(i)$ в положениях $i = 5,...,8$:

$$\overline{dZ(T_I)} = \frac{dZ(t_5) + dZ(t_6) + dZ(t_7) + dZ(t_8)}{4}. \quad (10)$$

Следовательно, окончательная формула для расчета Z_0 будет иметь следующий вид:

$$Z_0 = Z_{abs} - \overline{dZ(T_I)}. \quad (11)$$

Т.к. значение D_0 напрямую связано с D_{abs}, то для его вычисления используются средние значения $\overline{dH(T_D)}$ и $\overline{dD(T_D)}$, которые вычисляются за времена измерений $M(i)$ в положениях деклинометра/инклинометра $i = 1,...,4$:

$$\overline{dH(T_D)} = \frac{dH(t_1) + dH(t_2) + dH(t_3) + dH(t_4)}{4}; \quad (12)$$

$$\overline{dD(T_D)} = \frac{dD(t_1) + dD(t_2) + dD(t_3) + dD(t_4)}{4}. \quad (13)$$

Используя эти значения, имеем:

$$D_0 = D_{abs} - \arctan\left(\frac{\overline{dD(T_D)}}{H_0 + \overline{dH(T_D)}}\right). \quad (14)$$

Важно отметить, что формулу (14) для D_0 мы получили из той части соотношения (3), в которой участвует уже определённое базисное значение H_0. Расчет D_0 по другим

формулам, следующим из соотношения (3), математически оправдан, если использовать в них значение $\overline{dD(T_D)}$. Однако на практике это может привести к искажению результатов, поскольку в полученное значение D_0 внесет вклад величина H_{abs}, рассчитанная целиком за время T_I.

При ориентации вариометра в географической системе координат XYZ осуществляется регистрация относительного приращения северной составляющей поля dX вдоль оси, направленной на географический север, восточной составляющей dY вдоль оси, направленной на географический восток, и вертикальной составляющей dZ аналогично предыдущему случаю. В этом случае формулы для определения базисных значений горизонтальных составляющих X_0 и Y_0 будут следующие (для Z_0 вычисления совпадают с предыдущим случаем):

$$X_0 = X_{abs} - dX = \overline{H_{abs}(T_D)}\cos D_{abs} - \overline{dX(T_D)},$$

$$Y_0 = Y_{abs} - dY = \overline{H_{abs}(T_D)}\sin D_{abs} - \overline{dY(T_D)},$$

где

$$\overline{H_{abs}(T_D)} = \frac{H_{abs}(t_1) + H_{abs}(t_2) + H_{abs}(t_3) + H_{abs}(t_4)}{4},$$

$$H_{abs}(t_i) = \sqrt{F_{abs}^2(t_i) - (Z_0 + dZ(t_i))^2},$$

а $\overline{dX(T_D)}$ и $\overline{dY(T_D)}$ вычисляются аналогично (12) и (13). Таким образом, базисные значения X_0 и Y_0 привязаны к временной отметке T_D.

Важно отметить, что во всех расчетах, в которых участвуют значения dH, δD (dD), dZ, dX, dY и dF, предварительно исключаются из рассмотрения те значения, которые имеют маркировку техногенных аномалий.

4. Автоматический пересчет базисной кривой и расчет полных значений элементов поля

Как было сказано выше, полученные базисные значения привязаны к нерегулярным временным отметкам. Поэтому для расчета полных значений элементов поля с частотой дискретизации, соответствующей исходным вариационным измерениям, требуется регуляризация базисных значений. Согласно требованиям ИНТЕРМАГНЕТ [St-Louis, 2012] такая регуляризация должна обеспечивать шаг дискретизации 1 сутки с привязкой регулярных базисных значений к 12:00:00 UT каждых суток. При этом она может быть реализована любым методом, обеспечивающим гладкость результирующей кривой. В

мировой практике обсерваторских наблюдений для аппроксимации значений часто используется метод сглаживающего сплайна, входящий в инструментарий Curve Fitting Toolbox для Matlab (функция csaps).

Согласно правилам ИНТЕРМАГНЕТ базисная кривая должна строиться по наблюденным базисным значениям начиная с 1 декабря предыдущего года. На практике базисная кривая рассчитывается не по всем имеющимся значениям. Дело в том, что иногда некоторые базисные значения представляют собой выбросы на фоне общего множества, например, из-за допущенной ошибки при проведении абсолютных измерений за соответствующий момент времени. Перед построением сплайна такие значения необходимо удалить. Алгоритм удаления выбросов на множестве базисных значений реализуется в несколько этапов. Сначала сплайн строится по всем имеющимся значениям, начиная с 1 декабря предыдущего года. Далее оценивается разница между наблюденными значениями и аппроксимированными значениями за соответствующие моменты времени. В случае, если разница более чем в два раза превышает среднеквадратичное отклонение (2σ), соответствующее наблюденное значение исключается из дальнейшего рассмотрения. После чего сплайн строится заново с 1 декабря предыдущего года, но уже только по отобранным на предыдущем этапе наблюденным базисным значениям [Соловьев и Кудин, 2015б].

Другой помехой при построении сплайна служат скачки в наблюденных базисных значениях (рис. 2). Их причиной могут быть изменение настроек вариометра, его перемещение, а также появление или удаление статической помехи на обсерватории (например, внос огнетушителя в павильон). Информация о подобных событиях отслеживается сотрудниками обсерватории и заносится в базу геомагнитных данных при помощи специальной веб-формы. Информация содержит в себе точное время события в UT, код события, «пораженную» компоненту, свободное описание события и автора сообщения. В Центре геомагнитных данных обработка таких событий автоматизирована. В соответствующий момент времени осуществляется разрыв сплайна, после чего он перестраивается по отдельным сегментам до и после момента события. Финальный вариант базисной кривой для каждой из компонент сохраняется в базе геомагнитных данных.

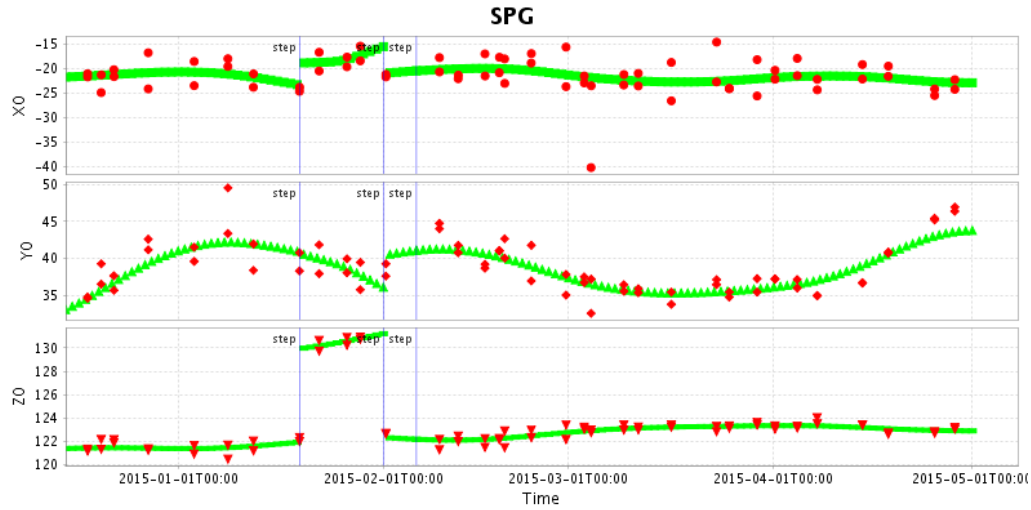

Рис. 2. Примеры скачков техногенной природы в базисных значениях (вертикальные линии). Красными маркерами помечены наблюденные базисные значения, зелеными – регулярные, аппроксимированные базисные значения.

Далее происходит расчет полных значений компонент поля с использованием базисных кривых и вариационных значений за период с 1 декабря предыдущего года. Как было отмечено выше, в течение каждых суток в UT принимается единое базисное значение для каждой компоненты. Формулы расчета полных значений в течение каждых суток приведены ниже для обоих случаев ориентации вариометра.

$$H_i^j = \sqrt{(H_0^j + dH_i^j)^2 + (dD_i^j)^2}\,,$$

$$D_i^j = D_0^j + \delta D_i^j = D_0^j + \arctan\left(\frac{dD_i^j}{H_0^j + dH_i^j}\right),$$

$$X_i^j = X_0^j + dX_i^j\,,$$

$$Y_i^j = Y_0^j + dY_i^j\,,$$

$$Z_i^j = Z_0^j + dZ_i^j\,,$$

где i – порядковый номер измерения в течение одних суток, j – порядковый номер суток.

При сохранении результирующих квази-окончательных данных в БД осуществляется их автоматическая очистка от техногенных помех. Для этого значения, полученные из измерений dH, δD (dD), dZ, dX, dY и dF с маркировкой техногенных аномалий (см. предыдущий подраздел), заменяются на «пропуск данных».

В Центре геомагнитных данных пересчет базисной аппроксимированной кривой и последующий пересчет квази-окончательных данных происходят автоматически при поступлении новых результатов абсолютных наблюдений: сначала по ним рассчитываются

абсолютные значения, затем базисные, по базисным значениям пересчитывается базисная кривая и с использованием базисной кривой осуществляется пересчет квази-окончательных данных (рис. 3).

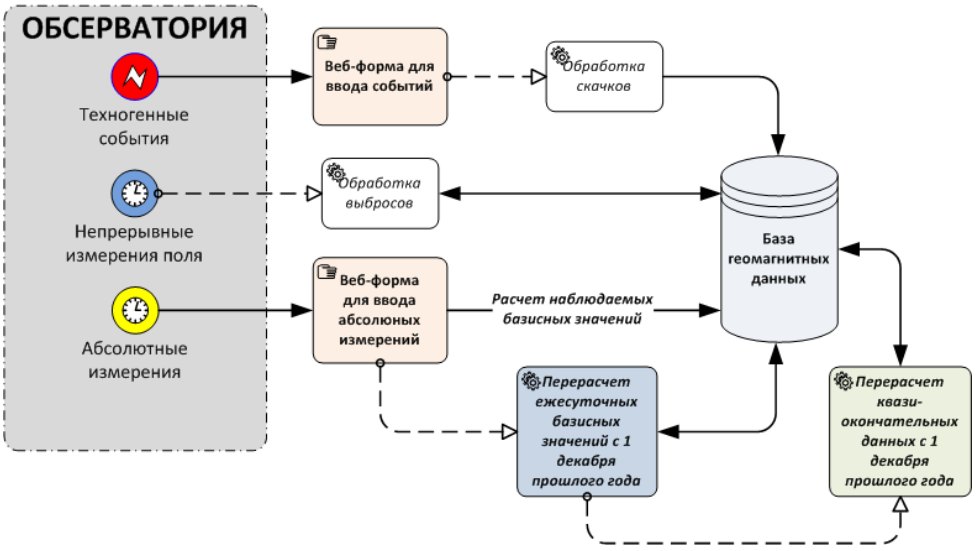

Рис. 3. Блок-схема автоматизированной системы расчета квази-окончательных данных Центра геомагнитных данных.

5. Выводы

Уникальной особенностью магнитных обсерваторий является предоставление временных рядов полных значений элементов магнитного поля. Если на большинстве обсерваторий мировой сети такие данные, называемые окончательными, подготавливаются с задержкой более года, то в Центре геомагнитных данных верифицированные, близкие к окончательным, данные рассчитываются автоматически с минимальной задержкой. Процедура состоит из следующих этапов: расчет абсолютных значений по результатам обсерваторских абсолютных измерений, расчет базисных значений для компонент вариометра, распознавание выбросов и скачков на множестве базисных значений, регуляризация базисных значений с 1 декабря предыдущего года, пересчет полных значений компонент поля с использованием базисных кривых и вариационных измерений элементов поля с 1 декабря предыдущего года. Процедура пересчета квази-окончательных данных выполняется при каждом поступлении в БД новых результатов абсолютных измерений из обсерватории. Таким образом, актуализация квази-окончательных данных происходит с минимальной задержкой по времени.

6. Список литературы

Соловьев А.А., Кудин Д.В. «Программа для расчета и визуализации разности между скалярными данными и модулем вектора поля, рассчитанным по векторным данным». Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ, №2015615571 от 21.5.2015а

Соловьев А.А., Кудин Д.В. «Программа для расчета и визуализации базисных значений компонент магнитного поля». Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ, №2015615555 от 20.5.2015б

Clarke, E., Baillie, O., Reay, S J., Turbitt, C W. (2013) A method for the near real-time production of quasi-definitive magnetic observatory data, Earth, Planets and Space, 65 (11). 1363-1374. 10.5047/eps.2013.10.001

Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. Warsaw: IAGA. ISBN: 0-9650686-2-5, 1996

Peltier, A. and A. Chulliat, On the feasibility of promptly producing quasi-definitive magnetic observatory data, Earth Planets Space, 62(2), e5-e8, doi:10.5047/eps.2010.02.002, 2010

Rasson JL (2005), About absolute geomagnetic measurements in the observatory and in the field, Publication Scientifique et Technique, No 040, L'institut Royal Meteorologique de Belgique, Brussels

St-Louis B., Ed. INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6. 2012