

УДК 550.8.053

СИСТЕМА УСКОРЕННОЙ ПОДГОТОВКИ КВАЗИОКОНЧАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ СТАНДАРТА ИНТЕРМАГНЕТ

© 2021 г. Д. В. Кудин^{1,2, *}, А. А. Соловьев^{1,3}, Р. В. Сидоров^{1, **},
В. И. Старостенко⁴, Ю. П. Сумарук⁴, О. В. Легостаева⁴

¹Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва, Россия

²Горно-Алтайский государственный университет (ГАГУ), г. Горно-Алтайск, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

⁴Институт геофизики им. С.И. Субботина НАНУ, г. Киев, Украина

*e-mail: d.kudin@gcras.ru

**e-mail: r.sidorov@gcras.ru

Поступила в редакцию 06.09.2019 г.

После доработки 12.02.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

В статье приводится описание системы подготовки квазиокончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. В отличие от окончательных данных, подготавливаемых не раньше, чем через год после измерения, данные, предоставляемые описанной системой, доступны через сутки после выполнения последней серии абсолютных наблюдений. Квазиокончательные данные находят применение при моделировании быстрых вариаций главного магнитного поля Земли и расчете индексов геомагнитной активности. В работе приводится анализ качества получаемых данных путем сравнения с одобренными окончательными данными ИНТЕРМАГНЕТ и сравнения с данными, полученными по моделям WMM и IGRF. Показано, что качество квазиокончательных данных, полученных по предложенной методике автоматизированных алгоритмов, сравнимо с качеством, которое обеспечивается традиционными подходами к подготовке окончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ.

DOI: 10.31857/S0016794021010090

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле Земли (МПЗ) — один из важнейших источников информации о внутреннем строении Земли и динамических процессах в околоземном пространстве. Основным поставщиком магнитных данных являются наземные магнитные обсерватории, которые проводят непрерывные измерения МПЗ в фиксированных точках пространства. Они рассчитаны на непрерывное функционирование в течение десятилетий для регистрации, прежде всего, вековых вариаций магнитного поля. Обсерваторские данные широко используются для расчета моделей главного МПЗ [Maus et al., 2010; Thebault et al., 2015] и в качестве калибрующих значений для спутниковых наблюдений. Данные магнитных обсерваторий также являются важным источником информации о процессах, происходящих в магнитосфере и ионосфере Земли на более коротких временных интервалах, в частности, для изучения геомагнитных бурь и суббурь. Помимо вклада в решение фундаментальных задач геомагнетизма, наблюдения магнитного поля на стационарных обсер-

ваториях также являются неотъемлемым элементом в работах некоторых промышленных отраслей: топливной, геологоразведочной, авиационной и др. Например, высокотехнологичная технология наклонно-направленного бурения нефтегазовых скважин предполагает решение задачи навигации буровой колонны по непрерывным измерениям геомагнитного азимута, приемлемая точность которых может обеспечиваться исключительно современной геомагнитной обсерваторией [Poedjono et al., 2011, 2013].

Указанные области применения предъявляют высокие требования как к качеству, так и к оперативности обсерваторских измерений. Качество таких данных напрямую зависит от множества факторов, включая место расположения обсерватории, качество использованных строительных материалов, измерительные приборы, качество организации измерений и алгоритмы обработки регистрируемых данных [Jankowski and Sucksdorff, 1996]. В силу непрерывного роста востребованности обсерваторских данных, активно развиваются методы их рутинной обработки с целью

повышения качества [например, Gvishiani et al., 2014; Lesur et al., 2017; Soloviev et al., 2018]). Кроме того, совершенствуются аппаратные решения для регистрации и потоковой передачи данных на наблюдений [Алешин и др., 2018].

Данная работа завершает цикл статей в журнале “Геомагнетизм и аэрономия”, охватывающих полный комплекс современных методов организации стационарных геомагнитных наблюдений — от новых подходов к полевым геомагнитным и геодезическим измерениям при выборе места установки обсерваторий [Кафтан и Красноперов, 2015; Красноперов и др., 2015], штатной работы обсерватории [Соловьев и др., 2016] до новых методов автоматизированного анализа и обработки регистрируемых измерений с целью своевременного получения качественных финальных геомагнитных данных. Именно о последнем аспекте пойдет речь в настоящей статье.

Основными стандартами качества данных магнитной обсерватории выступают требования [St-Louis, 2012], предъявляемые к обсерваториям мировой сети ИНТЕРМАГНЕТ [Love and Chulliat, 2013]. Согласно требованиям, обсерватории предоставляют ежеминутные значения трех компонент вектора геомагнитного поля, измеренные векторным магнитометром (вариометром), обычно феррозондового типа. Однако непрерывно регистрируемые значения представляют собой относительные изменения, а не полные значения компонент, поскольку подвержены дрейфу, обусловленному температурными вариациями, нелинейностью сигнальных электронных компонентов и другими причинами. Для периодической калибровки векторного магнитометра и компенсации возможного наклона постаментов, на котором установлен прибор, регулярно производятся абсолютные наблюдения компонент вектора магнитного поля [Alldredge, 1960; Wienert, 1970]. С помощью данных абсолютных наблюдений рассчитываются так называемые базисные значения, изменчивые во времени, которые в дальнейшем используются для получения рядов полных (окончательных) значений элементов поля. По этой причине обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ предоставляют два основных типа данных: вариационные (предварительные) данные, доступные в течение 72 ч после регистрации, и окончательные данные, очищенные и скорректированные с учетом базисных значений, но доступные с задержкой более года. В настоящее время существует потребность получения данных, близких к окончательным, с существенно меньшими задержками.

Квазиокончательные (верифицированные) данные представляют собой векторные измерения поля, скорректированные с учетом временных базисных значений непосредственно после реги-

страции, очень близкие по значениям к окончательным данным [Peltier and Chulliat, 2010]. На сегодняшний день всего четверть обсерваторий мировой сети ИНТЕРМАГНЕТ (<http://intermagnet.org>) способны производить удовлетворительные квазиокончательные данные, расходящиеся с окончательными менее, чем на 5 нТл. Квазиокончательные данные наиболее востребованы в таких важнейших задачах геомагнетизма, как построение оперативных моделей и изучение быстрых вариаций главного МПЗ [Soloviev et al., 2017a], а также расчет индексов геомагнитной активности. Согласно регламенту ИНТЕРМАГНЕТ задержка в расчете таких данных не должна превышать 3-х месяцев, однако по факту она не превышает 1 месяца. Очевидно, получение квазиокончательных данных является основным требованием при навигации буровой колонны по геомагнитным измерениям, которая упоминалась выше [Буслав и др., 2015; Гвишиани и Лукьянова, 2018].

Подготовку квазиокончательных данных можно условно разделить на два основных этапа: контроль качества непрерывных векторных измерений магнитного поля путем распознавания и удаления техногенных сбоев в магнитограммах; определение динамических базисных значений по результатам абсолютных наблюдений и расчет по ним временных рядов полных значений элементов поля.

Целью настоящей работы является демонстрация новой системы ускоренной автоматизированной подготовки квазиокончательных данных геомагнитных обсерваторий, а также оценка качества полученных с ее помощью данных. В качестве исходных данных используются обсерваторские измерения, непрерывно поступающие в Российско-украинский центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>) на базе Геофизического центра РАН (ГЦ РАН) [Гвишиани и др., 2018; Пилипенко и др., 2019]. Главным преимуществом системы является максимальная автоматизация этапов обработки и верификации геомагнитных данных с использованием элементов искусственного интеллекта. При этом, как будет показано далее, при существенном сокращении задержки в расчетах качество результирующих данных в целом оказывается выше по сравнению с традиционными подходами к подготовке окончательных данных.

2. РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПОМЕХ

В общемировой практике рутинная оценка качества измерений осуществляется операторами обсерваторий, как правило, вручную. Основными видами техногенных помех являются выбросы (спайки) и скачки [Nowozynski and Reda, 2007; Rasson, 2009]. Распространенным способом де-

тектирования спайков на исходной записи является анализ разностей (ΔF) 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]. Однако и такая запись может содержать ложные выбросы, а может и не содержать в себе искомым [Soloviev et al., 2012]. Первая ситуация может быть обусловлена асинхронной регистрацией данных 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. Недостатком ручной обработки предварительных данных является существенное увеличение времени подготовки очищенных данных, необходимых для расчета базисных значений. При этом ситуация заметно усложняется при переходе на более высокочастотную регистрацию данных — секундные записи по каждой из компонент могут содержать более тысячи техногенных выбросов в месяц [например, Soloviev et al., 2012]).

Для обнаружения и удаления выбросов в векторных минутных или секундных измерениях нами разработан автоматический метод, состоящий из двух этапов: применение алгоритма распознавания техногенных аномалий SP [Богоутдинов и др., 2010] или SPs [Soloviev et al., 2012] и верификация конечного результата путем сравнения результатов распознавания, полученных по данным множества обсерваторий. Кроме того, для уменьшения вероятности ложных срабатываний метода используются данные индикаторов геомагнитной активности [Gvishiani et al., 2016a; Гвишиани и др., 2018], вычисляемые непрерывно по мере поступления данных: мера аномальности [Soloviev et al., 2016a; Agayan et al., 2016], пиковая амплитуда, скорость изменения магнитного поля и оперативный K -индекс геомагнитной активности. Рассмотрим процедуру очистки геомагнитных данных более подробно.

Геомагнитные обсерватории, входящие в российско-украинский сегмент ИНТЕРМАГНЕТ, на регулярной основе, но с некоторой задержкой отправляют данные за определенный период времени в ГЦ РАН, где происходит их последующая обработка АПК МАГНУС [Gvishiani et al., 2016a]. В штатном режиме задержка поступления данных не превышает часа. После поступления данных происходит их асинхронная загрузка в таблицу реляционной базы геомагнитных данных (БД) [Gvishiani et al., 2016a], предназначенную для хранения предварительных (оперативных) данных. После этого запускается пересчет индикаторов геомагнитной активности, и обновленные значе-

ния записываются в отдельную таблицу БД. В таблице предварительных данных присутствует выделенное поле, в котором содержится в бинарном виде информация о принадлежности того или иного измерения техногенным помехам. Соответствующая маркировка измерений осуществляется асинхронно по результатам обработки минутных и секундных данных оригинальными алгоритмами поиска техногенных выбросов SP и SPs соответственно. Несмотря на то, что алгоритмы прошли успешную апробацию на реальных данных геомагнитных обсерваторий [Сидоров и др., 2012; Soloviev et al., 2012], остается вероятность ложного срабатывания. По этой причине маркированные области данных проходят вспомогательную процедуру автоматической верификации с привлечением данных других обсерваторий. Так, в случае, если помеха зарегистрирована на двух и более обсерваториях одновременно, флаг принадлежности соответствующих измерений техногенным сбоям снимается, поскольку высока вероятность того, что было зарегистрировано глобальное геомагнитное событие естественной природы (например, импульсная геомагнитная пульсация). На рисунке 1 показаны записи северной компоненты X (рис. 1а) и вертикальной компоненты Z (рис. 1б) вектора магнитного поля на обсерваториях Одесса (IAGA-код ODE, с. Степановка, Лиманский район, Одесская обл., Украина) и Киев (IAGA-код KIV, пгт. Дымер, Киевская обл., Украина) за 13 января 2017 г. Алгоритмом обнаружены техногенные выбросы на записях ODE в районе 18:10 UT (Z) и 18:42 UT (X, Z), но не обнаружены на записях KIV, поэтому в данном случае на этапе подготовки квазиокончательных данных система принимает решение удалить фрагменты данных obs. ODE, распознанные алгоритмом.

Другой важной информацией при очистке магнитных данных от техногенных сбоев являются оперативные данные геомагнитных индикаторов, которые представляют собой количественные показатели геомагнитной активности, упрощающие определение временных границ событий природного характера (например, магнитных бурь и суббурь). Следует отметить, что данные за периоды повышенной геомагнитной активности представляют особую ценность для космофизических исследований на предмет изучения короткопериодных флуктуаций магнитного поля. Поэтому ошибочная фильтрация техногенных помех, также характеризующихся малой длительностью, может вносить существенные искажения в интерпретацию результатов. В качестве примера на рис. 2 представлены данные векторного магнитометра (азимутальная компонента Y) obs. KIV совместно со значениями индикаторов геомагнитной активности — меры аномальности и оперативного K -индекса за

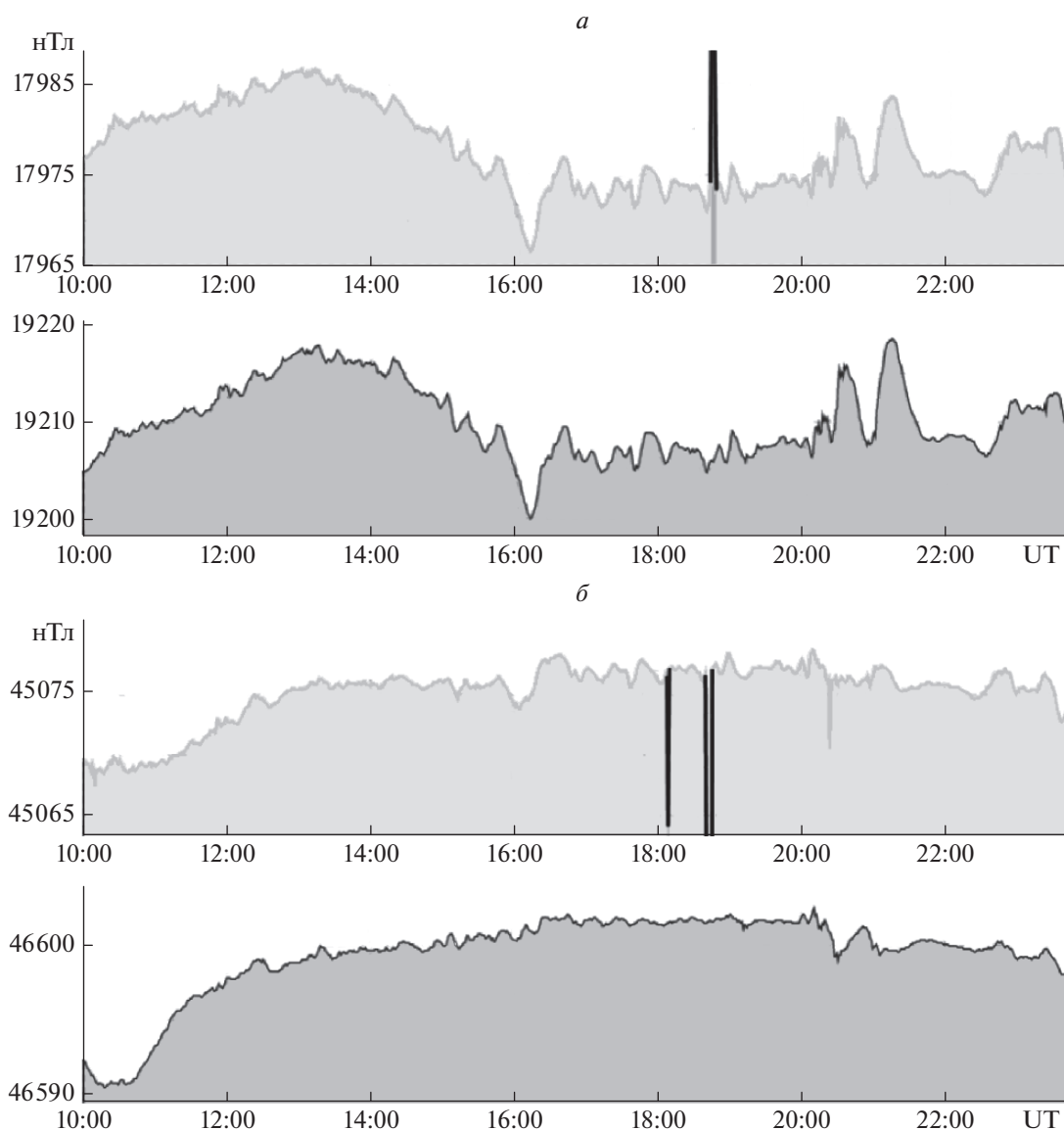


Рис. 1. Записи северной компоненты X (а) и вертикальной компоненты Z (б) вектора магнитного поля на обсерваториях Одесса (ODE, верхний график) и Киев (KIV, нижний график) за 13 января 2017 г. (время на графиках мировое) с результатами автоматического распознавания техногенных выбросов (черный цвет) (<http://geomag.gcras.ru>).

30 сентября 2016 г. Из рисунка 2 видно, что алгоритмом был ошибочно распознан выброс с 18:05 до 18:26 UT, имеющий явно природный, а не техногенный характер, поскольку за соответствующий период наблюдалась повышенная геомагнитная активность не только на KIV, но и на других обсерваториях. В данном случае, основываясь на индикаторах геомагнитной активности, система не расценивает помеченные значения как техногенные помехи и использует их при расчете квазиокончательных данных. В случае если система не может самостоятельно принять решение, помеченное событие заносится в список

событий, требующих отдельного анализа оператором.

3. РАСЧЕТ ТОЧЕЧНЫХ БАЗИСНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Абсолютные наблюдения производятся на obs. примерно 1–2 раза в неделю при помощи одноосевого феррозондового магнитометра, установленного на немагнитном теодолите (деклинометр/инклинометр), и скалярного магнитометра. Абсолютные значения магнитного поля D_{abs} (магнитное склонение), I_{abs} (магнитное наклонение) и F_{abs} (полная напряженность) опре-

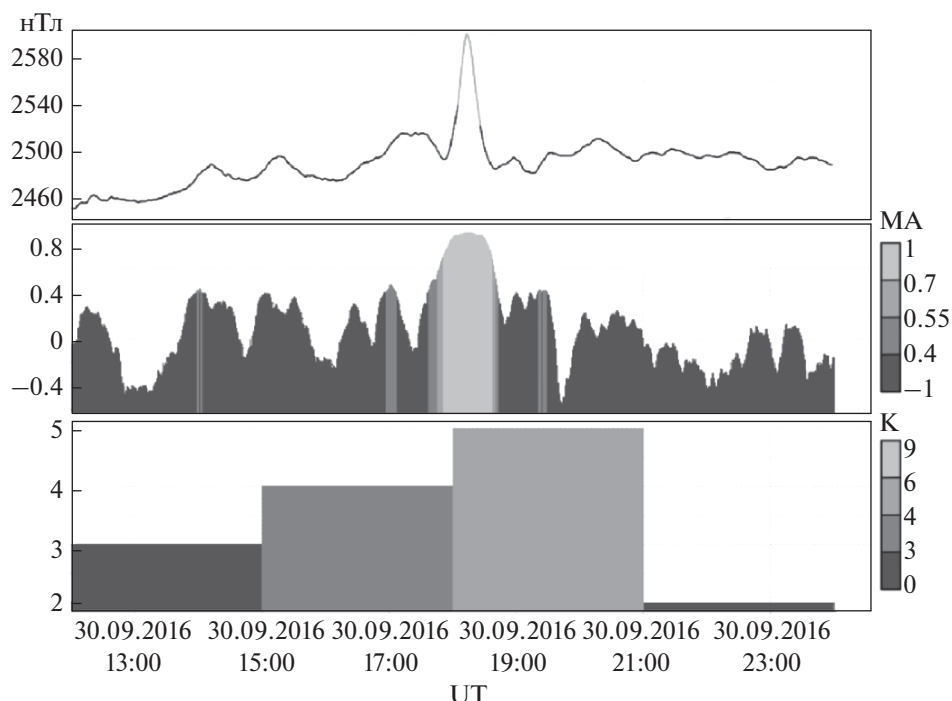


Рис. 2. Графики восточной компоненты Y_{obs} KIV (верхний), меры аномальности (средний) и оперативного K -индекса (нижний). На верхнем графике результат ошибочного распознавания техногенных выбросов выделен серым цветом (<http://geomag.gcras.ru>).

деляются в географических координатах установки деклинометра/инклинометра [Jankowski and Sucksdorff, 1996]. Расчет абсолютных значений зависит от метода абсолютных наблюдений — нуль-метода или офсетного метода [Rasson, 2005; Нечаев, 2006]. АПК МАГНУС позволяет операторам обсерваторий вводить результаты абсолютных наблюдений при помощи специализированного веб-интерфейса, который поддерживает оба метода. После ввода исходных данных из БД считываются очищенные вариационные данные, полученные за соответствующее время, и информация об ориентации векторного магнитометра. После чего происходит расчет т.н. наблюдаемых (точечных) базисных значений за моменты времени абсолютных наблюдений. 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 . Процедура расчета точечных базисных значений в обоих случаях подробно описана в работе [Соловьев и др., 2015]. Впоследствии формируется SQL-запрос к БД и результаты расчета абсолютных и базисных значений и их временная привязка импортируются в БД.

4. АВТОМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ БАЗИСНОЙ КРИВОЙ МОДУЛЯ МПЗ

В связи с ужесточением требований к обсерваториям, входящим в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ, обусловленным потребностью мирового научного сообщества в обсерваторских данных МПЗ высоко качества, появилась необходимость в контроле значений разности модуля МПЗ между постаменами в абсолютном павильоне обсерватории. Указанная разность (F_0) используется при расчете квазиокончатальных и окончательных данных и, по сути, является еще одним базисным значением. По этой причине был разработан сервис АПК МАГНУС и алгоритм обработки данных, позволяющий в автоматическом режиме вычислять F_0 . Исходными для расчета являются временные границы, которые наблюдатель фиксирует при выполнении измерения F_0 . Измерение выполняется путем перемещения датчика скалярного магнитометра со штатного постамента на постамент инклинометра/деклинометра, который демонтируется на это время. На рисунке 3а представлен сигнал, наблюдаемый в модуле МПЗ (F) при перемещении датчика. Фрагменты сигнала, выделенные серым цветом, являются помехами, образующимися в результате перемещения датчика. Математические алгоритмы распознавания помех, встроен-

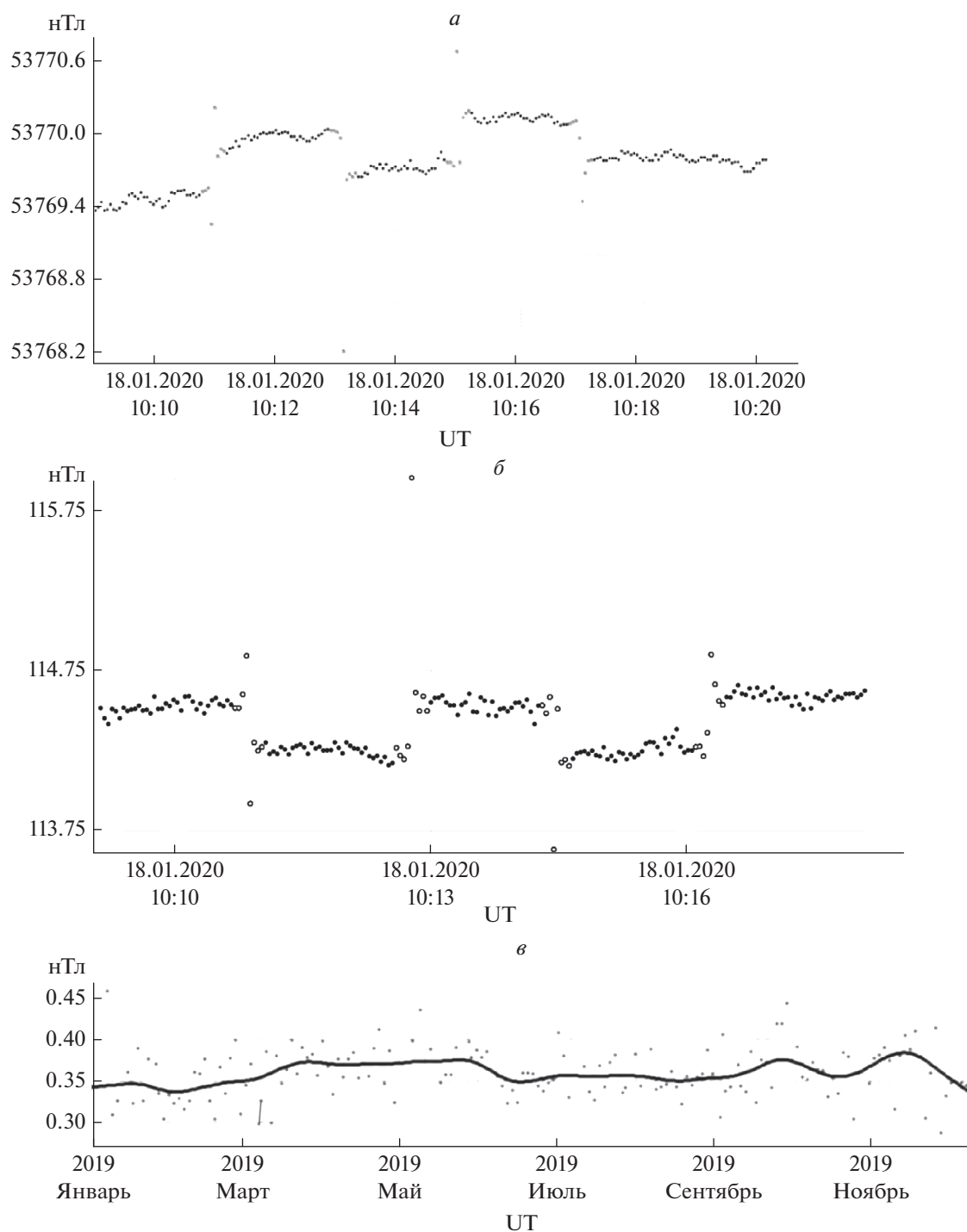


Рис. 3. Данные модуля МПЗ F с пометками (серый) автоматической системы обнаружения выбросов (*a*) и значения ΔF за интервал измерения F_0 (*б*) (значения, использованные при расчете, выделены черным). Точечные значения F_0 , рассчитанные по обсерваторским измерениям (точки), и интерполированная базисная F_0 (сплошная линия) за год показаны на (*в*). Время на графиках мировое.

ные в АПК МАГНУС, надежно размечают подобные события.

Веб-сервис АПК МАГНУС для расчета F_0 использует значения разности модуля вектора МПЗ

(ΔF), измеренного скалярным магнитометром и рассчитанного по компонентам вариометра. На рисунке 3б показан график значений ΔF во время проведения измерения F_0 .

Далее, внутри каждого из фрагментов (на рис. 3б их пять) алгоритм выделяет интервал спокойного поля и для каждого такого интервала рассчитывает медианное значение ΔF . F_0 рассчитывается как медианное значение последовательных разностей (в указанном примере их четыре) интервальных средних (медиан). Описанный алгоритм интегрирован в АПК МАГНУС и активно используется при автоматизированной обработке данных и расчете окончательных значений МПЗ. Регулярный ряд значений F_0 , полученный на обс. Климовская за год, показан на рис. 3в. Преимущества данного метода обеспечивают две составляющие:

1. метод не требует наличия двух скалярных магнитометров, для него достаточно одного штатного прибора;
2. метод полностью автоматизирован и лишен субъективного подхода оператора к выбору исследуемых интервалов.

5. АВТОМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОЛНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛЯ

Наблюдаемые базисные значения представляют собой нерегулярный временной ряд, т.к. сами абсолютные измерения носят нерегулярный характер (обычно 1–2 измерения в неделю). Для пересчета непрерывно регистрируемых вариаций компонент в полные значения 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 [Peltier and Chulliat, 2010; Soloviev et al., 2018], входящий в инструментальный Curve Fitting Toolbox для Matlab (функция csaps). В соответствии с рекомендациями ИНТЕРМАГНЕТ базисная кривая должна строиться по наблюдаемым базисным значениям начиная с 1 декабря предыдущего года. На практике базисная кривая рассчитывается не по всем имеющимся значениям. Дело в том, что иногда некоторые наблюдаемые базисные значения представляют собой выбросы на фоне общего множества, например, из-за допущенной ошибки при проведении абсолютных наблюдений 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 наблюдаемыми значениями и аппроксимированными значениями за соответствующие моменты времени. В случае если разница превышает порог отбраковки выбросов, соответствующее наблюдаемое значение исключается из дальнейшего рассмотрения. Порог отбраковки базисных значений настраивается эмпирически для каждой обсерватории в зависимости от частоты и качества абсолютных наблюдений. В случае обсерватории SPG порог равен удвоенному значению среднеквадратичного отклонения (2σ). После этого сплайн строится заново с 1 декабря предыдущего года, но уже только по отобранному на предыдущем этапе наблюдаемым базисным значениям.

Другой распространенной помехой при построении аппроксимации служат скачки в наблюдаемых базисных значениях. Примеры таких скачков приведены на графиках наблюдаемых базисных значений на рис. 4а и 4б (положения скачков отмечены вертикальными черными линиями). Их причиной могут быть изменение настроек вариометра, его перемещение, а также появление или удаление статической помехи на обсерватории (например, внос крупного железосодержащего предмета в павильон). Информация о подобных событиях отслеживается сотрудниками обсерватории и заносится в БД при помощи специальной веб-формы. Информация содержит в себе точное время события в UT, код события, “пораженную” компоненту, описание события в свободной форме и автора сообщения. В АПК МАГНУС 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 БД.

Далее происходит расчет полных значений компонент поля с использованием базисных кривых и вариационных значений (dH , dD , dZ или dX , dY , dZ) за период с 1 декабря предыдущего года до текущего момента времени. 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 (HDZ и XYZ):

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

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

$$X_i^j = X_0^j + dX_i^j, \quad Y_i^j = Y_0^j + dY_i^j, \quad Z_i^j = Z_0^j + dZ_i^j,$$

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

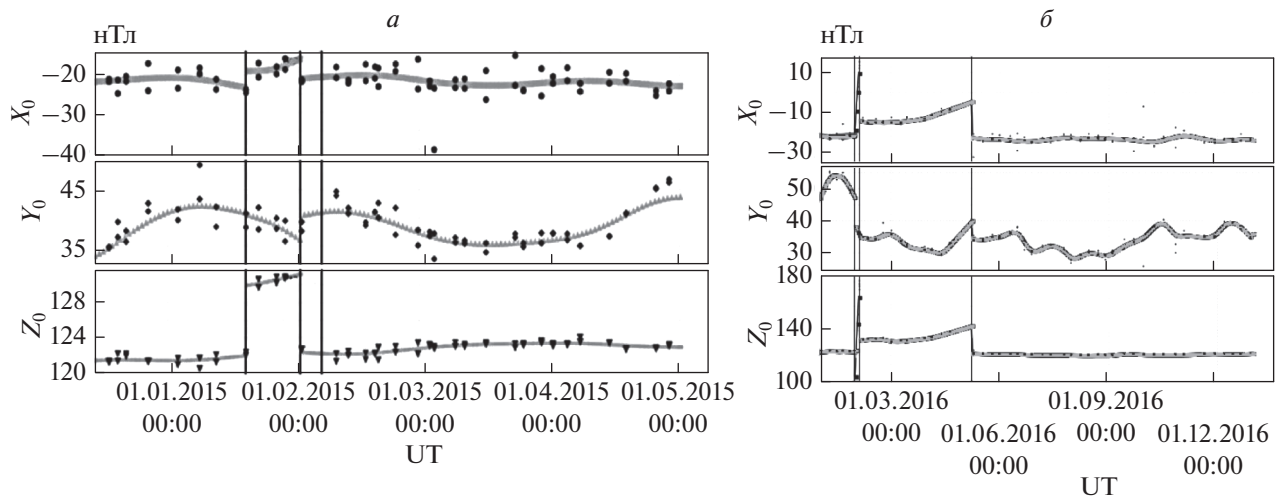


Рис. 4. Примеры скачков (вертикальные линии) техногенной природы в базисных значениях X_0 , Y_0 и Z_0 обс. ИНТЕРМАГНЕТ Санкт-Петербург (IAGA-код SPG), информация о которых содержится в БД [Gvishiani et al., 2016a], за период с 1 декабря 2014 г. по 1 мая 2015 г. (а) и за 2016 г. (б) (<http://geomag.gcras.ru>). Черными маркерами помечены наблюдаемые базисные значения, серыми — интерполированные базисные кривые.

При сохранении результирующих квазиокончатальных данных в БД из них удаляются техногенные помехи, которые были распознаны методом, описанным во втором разделе статьи.

В АПК МАГНУС пересчет базисной аппроксимированной кривой и последующий пересчет квазиокончатальных данных происходят автоматически при поступлении новых результатов абсолютных наблюдений: сначала по ним рассчитываются абсолютные значения, затем наблюдаемые базисные, по наблюдаемым базисным пересчитываются ежесуточные базисные значения, с использованием которых осуществляется пересчет квазиокончатальных данных. Блок-схема разработанной системы представлена в [Gvishiani et al., 2016a] и некоторых других работах авторов, посвященных АПК МАГНУС.

6. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КВАЗИОКОНЧАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБСЕРВАТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Квазиокончатальные данные обс. Санкт-Петербург (IAGA-код SPG) [Sidorov et al., 2017] рассчитываются автоматически и сохраняются в БД с каждым поступлением новых абсолютных измерений. Для оценки качества получаемых квазиокончатальных данных проведем сравнительный анализ с окончательными данными, одобренными ИНТЕРМАГНЕТ и опубликованными на сайте (<http://intermagnet.org>). Для сравнения будем использовать утвержденные окончательные данные за 2015–2016 г. [Soloviev et al., 2016c, 2017b].

Подготовка годового массива окончательных данных производилась в несколько шагов. На

первом этапе рассчитывались базисные значения с использованием вариационных данных [Soloviev et al., 2016b; Geomagnetic data ..., 2016], очищенных от техногенных помех, и проведенных в течение года абсолютных измерений.

Далее, первичные (точечные) базисные значения были пересчитаны с учетом устраненных ошибок измерений, приборных сбоев, температурных поправок и выбросов, связанных с повышенной геомагнитной активностью при проведении абсолютных измерений. Вновь полученные базисные значения были интерполированы сглаживающим сплайном (серая кривая на рис. 4а и 4б) с параметрами $p_x = 0.01$, $p_y = 0.01$, $p_z = 0.01$ для получения финальных ежесуточных базисных значений.

Из очищенных секундных данных МПЗ были получены минутные данные путем усреднения с коэффициентами фильтра Гаусса, рекомендованного техническим руководством сети ИНТЕРМАГНЕТ [St-Louis, 2012]. После учета рассчитанных ежесуточных базисных значений в итоге были получены годовые массивы окончательных минутных данных по трем компонентам. Кроме того, прямым усреднением были рассчитаны среднегодовые, среднесуточные и среднечасовые значения компонент МПЗ.

В качестве критерия №1 оценки качества квазиокончатальных данных оценивалась их покомпонентная разность с минутными окончательными данными. На рис. 5а показаны гистограммы значений покомпонентной разности между минутными квазиокончатальными и окончательными данными за 2016 г. В результате расчета уста-

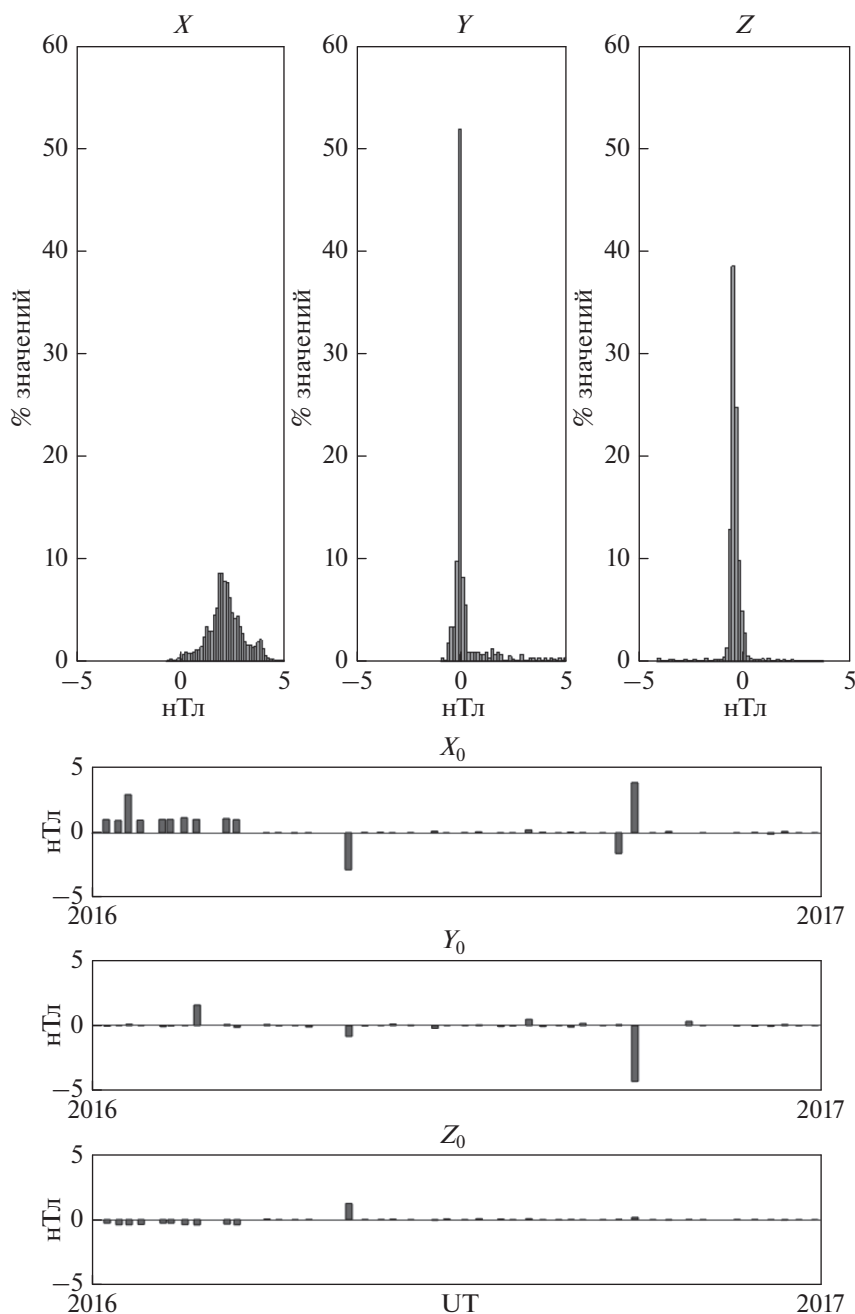


Рис. 5. Разности минутных квазиокончатальных и окончательных данных (а) и компонент базисных значений, полученных по результатам абсолютных наблюдений, для квазиокончатальных и окончательных данных obs. SPG за 2016 г. (б).

новлено, что по всем компонентам разность не превышает 5 нТл на 95% данных, в том числе:

- на 99.97% минутных значений по компоненте X ;
- на 96.16% минутных значений по компоненте Y ;
- на 100% минутных значений по компоненте Z .

Сдвиг в разностях по компоненте X (рис. 5а, левый график) обусловлен причинами, которые

отразились в квазиокончатальных, но были устранены в окончательных данных. Основной причиной являлось вычисление склонения D без компенсации ошибки теодолита, что приводило к сдвигу в базисных значениях X_0 , Y_0 . Наряду с этим, при подготовке окончательных данных была устранена систематическая некомпенсированная задержка, обусловленная прецессией протонного магнитометра, приводящая к 2–3-х секундной рассинхронизации данных векторного и

скалярного магнитометров. Также, при последующей подготовке окончательных данных было уточнено значение коэффициента преобразования, который используется для пересчета данных вариометра из вольт в нанотеслы.

В качестве критерия качества № 2 рассматривалась разность между временными базисными значениями, которые использовались при формировании квазиокончателных данных, и окончательными базисными значениями. Первые были получены за период с 1 декабря 2015 г. и далее ежемесячно до 31 декабря 2016 г., вторые — за период с 1 декабря 2015 г. по 31 января 2017 г. Анализ показал, что для базисных значений компонент Y_0 , Z_0 амплитуда разности не превышает 5 нТл, а для базисных значений X_0 — 10 нТл. Последнее связано с выбросами, отфильтрованными вручную при расчете окончательной базисной кривой. Результаты представлены на рис. 5б.

Как видно из представленных сравнений, полученные показатели качества квазиокончателных данных полностью удовлетворяют критериям ИНТЕРМАГНЕТ (www.intermagnet.org), а по некоторым показателям даже превышают требуемые характеристики.

7. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ С МОДЕЛЯМИ ГЛАВНОГО МПЗ

Помимо того, что наблюдения на магнитных обсерваториях сами по себе служат источником данных для построения моделей МПЗ, они также широко используются для верификации таких моделей, построенных, например, по спутниковым наблюдениям [Соловьев и Смирнов, 2018]. Среди наиболее популярных моделей такого рода можно назвать International Geomagnetic Reference Field (IGRF) 12-го поколения [Thebault et al., 2015] и World Magnetic Model (WMM) [Chulliat et al., 2019]. Модели позволяют аналитически рассчитывать абсолютные значения трех компонент МПЗ в заданной точке за указанное время. Несмотря на регулярное обновление моделей (для моделей IGRF и WMM период обновления составляет 5 лет), стремительные изменения МПЗ могут потребовать их немедленной актуализации. Так, например, модель WMM была обновлена в феврале 2019 г. вследствие существенного ускорения движения северного магнитного полюса. Актуальные квазиокончателные данные позволяют оперативно контролировать расхождения между модельными прогнозами и фактическими наблюдениями вблизи обсерваторий. Очевидно, достоверность подобных экспериментов напрямую зависит от качества квазиокончателных данных, которое должно согласоваться со стандартами ИНТЕРМАГНЕТ. Приведем сравнение квазиокончателных данных обс. Санкт-Петербург за

2016 г. с расчетными значениями МПЗ согласно указанным моделям. По аналогии с предыдущим разделом определим уровень доверия результатам оценки качества модели.

Для координат расположения обсерватории SPG были получены среднесуточные абсолютные значения трех компонент МПЗ. На рисунке 6 для всех трех компонент магнитного поля представлены графики среднесуточных квазиокончателных значений компонент МПЗ обсерватории SPG (обозначены в легенде как SPG_{Qdef}) в сравнении с графиками посуточных значений согласно моделям IGRF и WMM (обозначенными, соответственно, SPG_{IGRF} и SPG_{WMM}). В обоих случаях значения центрированы вычитанием среднегодового значения.

Как видно из рис. 6, отклонение среднесуточных данных от модельных может превышать 20 нТл. Вклад поля аномалий, вызванных неоднородностью земной горы, в данном случае можно считать несущественным, так как оно вносит постоянное смещение поля, устраняемое вычитанием среднегодового значения. Основным источником внутригодовых различий между данными наблюдений и моделями является внешнее магнитное поле и его сезонная вариация. Для уменьшения влияния внешнего поля при сравнении с модельными данными были выбраны наиболее спокойные дни каждого месяца.

Выбор спокойных дней основывался на анализе K -индекса геомагнитной активности [Johnston, 1943]. Для каждых суток 2016 г. рассчитывались сумма K -индексов, максимальный K -индекс и сумма квадратов K -индексов. Для каждого набора рассчитанных значений суткам присваивался номер в порядке увеличения значения. Среднее значение номеров, полученных по трем наборам, являлось характеристикой спокойствия дня. Кроме того, в качестве дополнительного критерия выбора использовалось значение A -индекса. Выбранные дни считались спокойными, если суточное значение A -индекса не превышало 10.5 нТл, и среди значений K -индекса за сутки не было ни одного, превышающего 3, и было не более одного, превышающего 2. Если среди выбранных дней существовали дни с неопределенными, по причине отсутствия данных, значениями K -индекса, то такие дни исключались из дальнейшего рассмотрения. По описанной методике был выбран 71 спокойный день на обсерватории в 2016 г. Для этих дней были рассчитаны среднеквадратичное отклонение и абсолютное смещение относительно модельных данных (табл. 1). На рисунках 7а и 7б для трех компонент МПЗ представлены значения отклонений среднесуточных значений за спокойные дни (обозначенных X_{Qdef} , Y_{Qdef} и Z_{Qdef}) от данных соответствующих моделей (обозначенных, соответственно, X_{IGRF} , Y_{IGRF} , Z_{IGRF} и X_{WMM} ,

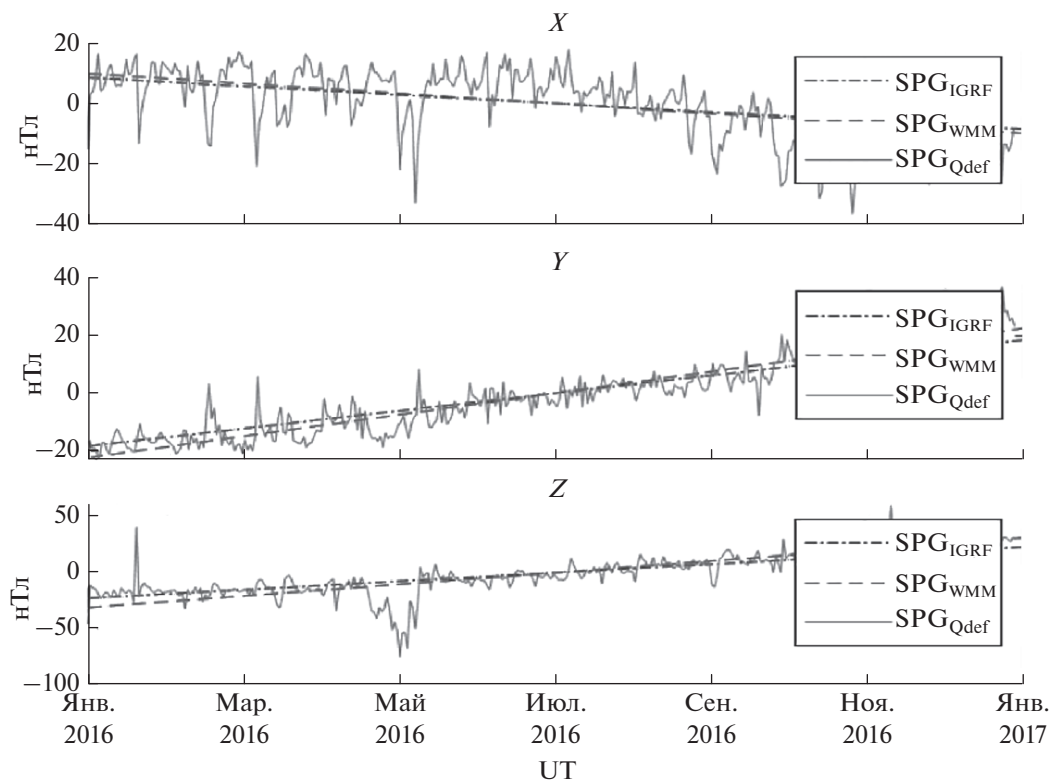


Рис. 6. Центрированные ежесуточные значения компонент МПЗ на obs. SPG за 2016 г.: квазиокончательные данные (непрерывная линия), модельные данные IGRF (штрих-пунктир) и WMM (штрих).

Y_{WMM} , Z_{WMM}). На графиках для компоненты X по наблюдаемым отклонениям значений построена огибающая, демонстрирующая сезонную вариацию, которая традиционно устраняется при построении моделей главного МПЗ.

Таким образом, сравнение квазиокончательных и модельных данных показало, что годовой ход главного МПЗ на obs. Санкт-Петербург, прогнозируемый моделями WMM и IGRF, соответствует данным наблюдений. Для спокойных дней среднеквадратичная разность между среднесуточными измеренными значениями и модельными данными не превышает 5 нТл (табл. 1). Гistogramмы значений разности представлены на рис. 7в.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным достоинством магнитных обсерваторий является предоставление регулярных временных рядов полных значений элементов магнитного поля. Если на большинстве обсерваторий мировой сети такие данные, называемые окончательными, подготавливаются с задержкой более года, то средствами АПК МАГНУС верифицированные, близкие к окончательным (квазиокончательные) данные рассчитываются автоматически с минимальной задержкой. Процедура состоит из следующих этапов: распознавание выбросов в вариационных данных, расчет абсолютных значений по результатам обсерваторских абсолютных наблюдений, расчет базисных значе-

Таблица 1. Покомпонентное сравнение квазиокончательных и модельных данных за спокойные дни 2016 г.

	Среднегодовая разность, нТл		СКО за год, нТл	
	WMM	IGRF	WMM	IGRF
Компонента X	−175.35	−189.27	3.84	3.89
Компонента Y	73.78	62.50	2.77	3.31
Компонента Z	146.50	167.48	4.40	4.08

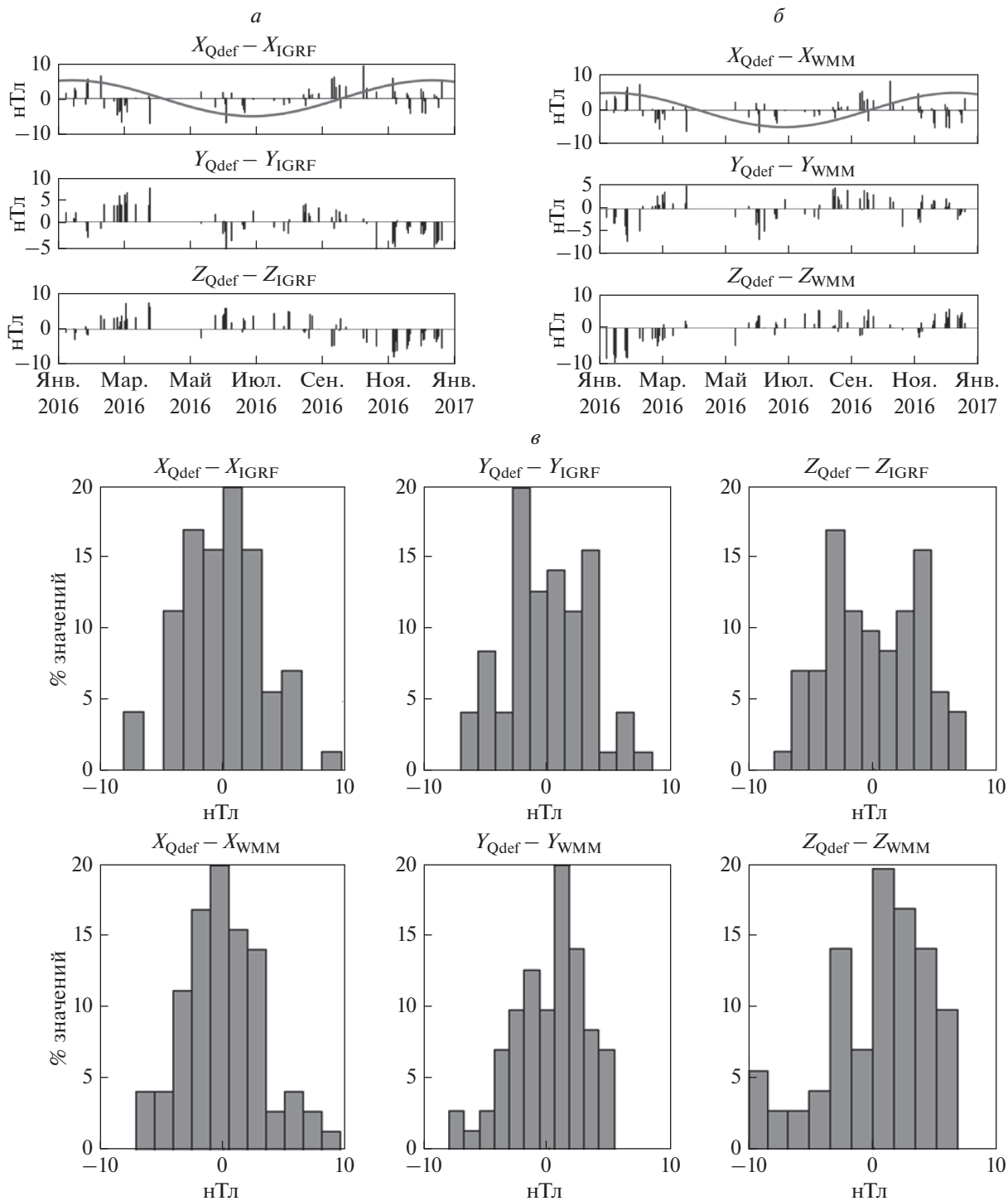


Рис. 7. Разность среднесуточных значений квазиокончатальных данных за спокойные дни и модельных данных IGRF (а) и WMM (б); гистограммы разностей центрированных среднесуточных значений квазиокончатальных данных за спокойные дни и данных согласно моделям (в) IGRF (верхний ряд) и WMM (нижний ряд).

ний 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

и вариационных данных с 1 декабря предыдущего года. Все рассчитанные данные сохраняются в соответствующих разделах реляционной БД. Процедура пересчета квазиокончатальных данных выполняется при каждом поступлении новых ре-

результатов абсолютных наблюдений из обсерватории. За счет внедрения автоматизированных алгоритмов обработки данных разработанная технология во многом облегчает и ускоряет процедуру подготовки результирующих данных. Крайне важно, что при этом качество получаемых данных остается сравнимым с тем качеством, которое обеспечивается традиционными подходами к подготовке окончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Это также подтверждается результатами их сравнения с данными высокоточных моделей, построенных по спутниковым данным. Своевременный доступ к высококачественным регулярным измерениям полных значений поля имеет не только фундаментальное значение при изучении быстрых вариаций главного магнитного поля [например, Soloviev et al., 2017a]) и оперативной актуализации соответствующих моделей, но также широко востребован и для изучения внешних магнитных полей [например, Гвишиани и др., 2015; Gvishiani et al., 2016b]).

9. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты, представленные в этой статье, получены с использованием данных, регистрируемых геомагнитными обсерваториями. Мы благодарим национальные институты, которые их поддерживают, сеть ИНТЕРМАГНЕТ за продвижение высоких стандартов функционирования геомагнитных обсерваторий (<http://www.intermagnet.org>) и Российско-украинский центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>) за свободное распространение данных в режиме онлайн. В работе использовались данные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту, чьи замечания помогли значительно усовершенствовать и дополнить текст рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешин И.М., Гетманов В.Г., Груднев А.А., и др. Компактное энергоэффективное устройство сбора и оперативной передачи геомагнитных данных // Науч. Приборостр. Т. 28. № 3. С. 5–13. 2018.
- Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Соловьев А.А., Кин Э. Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. I. Выбросы на магнитограммах всемирной сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. № 11. С. 99–112. 2010.
- Буслаев Г.В., Пыстин В.С., Удоратин В.В., Шергин А.С. Определение положения ствола скважины путем измерения магнитного поля Земли при бурении протяженных горизонтальных скважин в Арктике // Изв. Коми науч. центра УрО РАН. Выпуск 3(23). С. 91–100. 2015.
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Физика Земли. № 4. С. 19–30. 2018.
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Кудин Д.В., Карапетян Д.К., Симонян А.О. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // Вестник ОНЗ РАН. Т. 10. NZ4001. 2018. <https://doi.org/10.2205/2018NZ000357>
- Гвишиани А.Д., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., Соловьев А.А., Легостаева О.В. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 3. С. 314–322. 2015. <https://doi.org/10.7868/S0016794015030098>
- Кафтан В.И., Красноперов Р.И. Геодезические наблюдения на геомагнитных обсерваториях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 1. С. 123–129. 2015.
- Красноперов Р.И., Сидоров Р.В., Соловьев А.А. Современные геодезические методы высокоточной привязки геофизических съемок на примере магниторазведки // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 4. С. 568–576. 2015.
- Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 140 с. 2006.
- Пилюшенко В.А., Красноперов Р.И., Соловьев А.А. Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России // Вестник ОНЗ РАН. Т. 11. NZ1103. 2019. <https://doi.org/10.2205/2019NZ000362>
- Сидоров Р.В., Соловьев А.А., Богоутдинов Ш.Р. Применение алгоритма SP к магнитограммам ИНТЕРМАГНЕТ в условиях неспокойной геомагнитной обстановки // Физика Земли. № 5. С. 53–57. 2012.
- Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Хохлов А.В. Новая геомагнитная обсерватория “Климовская” // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 3. С. 365–379. 2016.
- Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Кудин Д.В. Автоматизированный расчет квази-окончательных данных. 2015. URL: <http://geomag.gcras.ru/materials-man.html>
- Соловьев А.А., Смирнов А.Г. Оценка точности современных моделей главного магнитного поля Земли с использованием ДМА-методов распознавания пониженной геомагнитной активности по данным геомагнитных обсерваторий // Физика Земли. № 6. С. 72–86. 2018.
- Agayan S., Bogoutdinov Sh., Soloviev A., Sidorov R. The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications // Data Sci. J. V. 15. 16. P. 1–21. 2016. <https://doi.org/10.5334/dsj-2016-014>
- Allredge L.R. A proposed automatic standard magnetic observatory // J. Geophys. Res. V. 65. P. 3777–3786. 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i011p03777>
- Chulliat A., Brown W., Alken P., Macmillan S., Nair M., Beggan C., Woods A., Hamilton B., Meyer B., Redmon R. Out-of-Cycle Update of the US/UK World Magnetic Model for 2015–2020: Technical Note // National Centers for Environmental Information. NOAA. 2019. <https://doi.org/10.25921/xhr3-0t19>
- Clarke E., Baillie O., Reay S.J., Turbitt C.W. A method for the near real-time production of quasi-definitive magnetic

- observatory data // *Earth Planets Space*. V. 65. P. 1363–1374. 2013.
<https://doi.org/10.5047/eps.2013.10.001>
- Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016.
<https://doi.org/10.2205/SPG2012>
- *Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev A., Khokhlov A.* Survey of geomagnetic observations made in the Northern sector of Russia and new methods for analysing them // *Surv. Geophys.* V. 35. P. 1123–1154. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s10712-014-9297-8>
- *Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R.* Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment // *Data Sci. J.* V. 15. P. 18. 2016a.
<https://doi.org/10.5334/dsj-2016-018>
- *Gvishiani A.D., Sidorov R.V., Lukianova R.Yu., Soloviev A.A.* Geomagnetic activity during St. Patrick's Day storm inferred from global and local indicators // *Russ. J. Earth Sci.* V. 16. ES6007. 2016b.
<https://doi.org/10.2205/2016ES000593>
- *Jankowski J., Sucksdorff C.* Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. Warsaw: International Association of Geomagnetism and Aeronomy. 232 p. 1996.
- *Johnston H.F.* Mean K-indices from twenty one magnetic observatories and five quiet and five disturbed days for 1942 // *Terr. Magn. Atmos. Elec.* V. 48. № 4. P. 219–227. 1943.
<https://doi.org/10.1029/TE048i004p00219>
- *Lesur V., Heumez B., Telali A., Lallanne X., Soloviev A.* Estimating error statistics for Chambon-la-Forêt observatory definitive data // *Ann. Geophys.* V. 35. № 4. P. 939–952. 2017.
<https://doi.org/10.5194/angeo-35-939-2017>
- *Love J.J., Chulliat A.* An international network of magnetic observatories // *Eos*. V. 94. № 42. P. 373–374. 2013.
<https://doi.org/10.1002/2013EO420001>
- *Maus S., Macmillan S., McLean S., Hamilton B., Thomson A., Nair M., Rollins C.* The US/UK World Magnetic Model for 2010–2015. NOAA Technical Report. NESDIS/NGDC. 2010. URL: http://www.geomag.bgs.ac.uk/documents/WMM2010_Report.pdf
- *Nowozynski K., Reda J.* Comparison of observatory data in quasi-real time // *Reda J.* (ed). XII IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing. Poland. Belsk:Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. C-99. № 398. P. 123–127. 2007.
- *Peltier A., Chulliat A.* On the feasibility of promptly producing quasi-definitive magnetic observatory data // *Earth Planets Space*. V. 62. 2. P. e5–e8. 2010.
<https://doi.org/10.5047/eps.2010.02.002>
- *Poedjono B., Beck N., Buchanan A., Brink J., Longo J., Finn C.A., Worthington E.W.* Geomagnetic Referencing in the Arctic environment / *SPE Arctic and Extreme Environments Conference & Exhibition*. Moscow, Russia, 18–20 Oct. 2011. SPE-149629-PP. 2011.
<https://doi.org/10.2118/149629-MS>
- *Poedjono B., Beck N., Buchanan A., Borri L., Maus S., Finn C.A., Worthington E.W., White T.* Improved geomagnetic referencing in the Arctic environment / *SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 15–17 Oct. 2013. SPE-166850-MS. 2013.
<https://doi.org/10.2118/166850-MS>
- *Rasson J.L.* About absolute geomagnetic measurements in the observatory and in the field. Publication Scientifique et Technique. № 040. Brussels: L'institut Royal Meteorologique de Belgique. 2005.
- *Rasson J.* Testing the time-stamp accuracy of a digital variometer and its data logger. / *Love J.J.* (ed) *Proc. XIIIth IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing*. Boulder and Golden, CO, USA. Geological Survey Open File Report. № 1226. P. 225–231. 2009.
- *Sidorov R., Soloviev A., Krasnoperov R., Kudin D., Grudnev A., Kopytenko Y., Kotikov A., Sergushin P.* Saint Petersburg magnetic observatory: From Voeikovo subdivision to INTERMAGNET certification // *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.* V. 6. № 2. P. 473–485. 2017.
<https://doi.org/10.5194/gi-6-473-2017>
- *Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S.* Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalously // *Ann. Geophys.* V. 59. № 6. G0653. 2016a.
<https://doi.org/10.4401/ag-7116>
- *Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S.* Detection of secular acceleration pulses from magnetic observatory data // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 270. P. 128–142. 2017a.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.07.005>
- *Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A., Heumez B.* Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // *Earth Planets Space*. V. 64. № 9. P. 743–752. 2012.
<https://doi.org/10.5047/eps.2012.03.004>
- *Soloviev A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sidorov R.* Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016b.
<https://doi.org/10.2205/SPG2012min>
- *Soloviev A., Kopytenko Yu., Kotikov A., Kudin D., Sidorov R.* 2015 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field. ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016c.
<https://doi.org/10.2205/SPG2015min-def>
- *Soloviev A., Kopytenko Yu., Kotikov A., Kudin D., Sidorov R.* 2016 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field. ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2017b.
<https://doi.org/10.2205/SPG2016min-def>
- *Soloviev A., Lesur V., Kudin D.* On the feasibility of routine baseline improvement in processing of geomagnetic observatory data // *Earth Planets Space*. V. 70. P. 16. 2018.
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0786-8>
- *St-Louis B.* INTERMAGNET technical reference manual. Version 4.6. 92 p. 2012.
- *Thebault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // *Earth Planets Space*. V. 67. P. 79. 2015.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
- *Wienert K.A.* Notes on geomagnetic observatory and survey practice. Front Cover. Paris: Unesco, 1970. 217 p.