

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Институт космических исследований и распространения  
радиоволн**  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

С.Ю. Хомутов

**ОБРАБОТКА МАГНИТНЫХ ДАННЫХ НА ОБСЕРВАТОРИЯХ**  
**(описание специализированного программного пакета)**

редакция 1.2  
декабрь 2017 г.

с.Паратунка, Камчатский край

Хомутов С.Ю. Обработка магнитных данных на обсерваториях (описание специализированного программного пакета) / ИКИР ДВО РАН. - ред.1.2, декабрь 2017 г. - с.Паратунка, Камчатский край.: ИКИР ДВО РАН, 2017 г. - 114 с.

В настоящей рукописи представляется описание программного пакета, предназначенного для полной обработки результатов магнитных измерений на обсерваториях и подготовки итоговых данных в соответствии с требованиями INTERMAGNET. Кроме формального описания программного обеспечения (вызываемых скриптов и результатов их работы) рукопись содержит отступления с обсуждением различных аспектов процесса работы с данными на магнитной обсерватории, в том числе тех, которые остаются предметом дискуссий мирового сообщества магнитологов. Рукопись подготовлена при поддержке российско-индийского гранта РФФИ №16-55-45007.

## Предисловие

Обсерватории, выполняющие многолетние, стандартные и координированные наблюдения за различными полями и процессами, в том числе за магнитным полем Земли, являются важнейшим элементом системы научного познания. В последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в развитии приборной базы обсерваторий, систем коммуникаций и работы с данными. В отношении магнитных измерений мы видим массовый переход с аналоговых кварцевых датчиков с регистрацией геомагнитных вариаций на фотобумагу и абсолютных кварцевых магнитометров на цифровые компонентные магнитометры с высоким разрешением по полю и по времени и приборы для абсолютных наблюдений на основе немагнитных теодолитов. При этом появляются экспериментальные разработки, ориентированные на автоматизацию и повышение достоверности и частотного диапазона измерений. Развитие систем коммуникаций, в том числе в глобальном масштабе, позволяет оперативно передавать данные, как первичные, так и обработанные, в центры их сбора или непосредственно пользователям, независимо от местонахождения обсерватории. Внедрение новых вычислительных технологий на аппаратном уровне магнитометров повышает качество первичных данных, а использование развитых программных разработок на рабочем месте магнитолога значительно увеличивает эффективность его работы с данными.

Однако в последние годы наблюдается некоторый разрыв между прогрессом в развитии средств магнитных измерений и коммуникаций на обсерваториях с процессом обработки получаемых данных. Это можно видеть, например, в различии количества обсерваторий, предоставляющих в GIN INTERMAGNET минутные данные в статусе Reported, т. е., по сути, "сырые" необработанные данные, непосредственно поступающие с магнитометров, и количества обсерваторий, подготавливающих данные в статусе Quasi-definitive, которые требуют особого внимания со стороны персонала. Ещё больший разрыв возникает при подготовке итоговых (Definitive) данных — только незначительная часть обсерваторий предоставляет эти данные к июлю следующего года, т. е. к официальному обозначенному сроку, а данные Definitive многих обсерваторий появляются с задержками год и более. Ещё одним индикатором проблемы может быть качество получаемых после обработки данных — в итоговых данных остаются помехи и скачки, принятые базисные значения получены методами, неоптимально представляющими реальное поведение базисных линий, и др. Причин перечисленного выше может быть множество, например, недостаточная квалификация персонала обсерватории, а при переносе процесса обработки в центры данных с высококвалифицированными специалистами начинает сказываться недостаток сопутствующей информации об условиях измерений. На наш взгляд, одной из важных причин, а в настоящее время — может быть и наиболее важной, является отсутствие развитого, эффективного и дружески ориентированного программного обеспечения для работы с первичными данными и подготовки итоговых данных в различных статусах INTERMAGNET непосредственно на рабочем месте магнитолога. Ещё один момент — в части аппаратуры и коммуникаций существуют определённые стандарты INTERMAGNET, например, параметры магнитометров по частоте, чувствительности и т.п. или протоколы для передачи данных по email и спутниковым каналам. Однако требований к ПО не имеется, определены только основные методические процедуры и состав выходных данных.

Понятно, что поскольку итоговые данные обсерваториями всё же предоставляются, то обработка результатов измерений выполняется, т. е. какие-то вычислительные средства имеются и используются. Таким образом, проблема не в отсутствии ПО как такового, а в эффективности и удобстве его использования. Личный опыт автора показывает, что, например, отсутствие обычного конвертера минутных данных Definitive в месячные

бинарные файлы формата IAF приводит к необходимости обращаться к кому-то с просьбой сделать такую конвертацию. Тогда в процессе интерактивной обработки "проверка — исправление - вывод данных" возникает внешнее звено, частое обращение к которому становится сдерживающим фактором. Как результат, итоговые данные представляются не с тем качеством, с которым они могли бы быть получены. Таких примеров много — и это говорит о том, что проблемы с программным обеспечением (ПО) для обработки результатов магнитных измерений на обсерваториях INTERMAGNET существуют.

Автор имеет почти тридцатилетний опыт работы на обсерваториях, в том числе, более десяти лет связан с организацией обсерваторских магнитных измерений. Этот опыт, определённые навыки программирования и необходимость эффективно обрабатывать и анализировать результаты магнитных измерений привели к тому, что был разработан пакет программ, ориентированный именно на работу с данными в условиях обсерватории. Более того, в 2016-2017 гг. в рамках совместного российско-индийского проекта РФФИ этот пакет был модернизирован в части унификации работы с данными, получаемыми при измерениях различными магнитометрами, в том числе, на двух индийских магнитных обсерваториях и на четырёх обсерваториях ИКИР ДВО РАН, и активно использовался при выполнении научных задач по проекту.

Как результат, возникла необходимость подготовить руководство по работе с этим ПО. Однако, в процессе написания стало понятно, что простого "руководства по эксплуатации" будет недостаточно — для понимания выполняемых действий желательно дать более развёрнутое описание, затронув при этом и вопросы методики, и вопросы алгоритмов. В итоге использовалось изложение материала в стиле эссе (или с элементами эссе), когда в более-менее строгую последовательность, описывающую этапы работы скриптов или функций при обработке, включены отступления, в которых разъясняется или дискутируется тот или иной методический вопрос, касающийся магнитных наблюдений на обсерваториях.

Автор надеется, что представленные материалы даже без реального использования описываемого программного пакета будут интересны магнитологам, создадут почву для размышлений и подвигнут кого-то из них на создание своих программ для работы с результатами магнитных измерений.

Автор выражает огромную признательность своим коллегам, знания и опыт которых и многолетнее общение с которыми, позволили ему хотя бы отчасти причислить себя к сообществу магнитологов: Станиславу Алексеевичу Нечаеву, магнитологу обсерватории "Патроны" ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск; Ольге Ивановне Федотовой, магнитологу обсерватории "Ключи" ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск; Жану Рассону, выдающемуся магнитологу и специалисту обсерватории "Dourbes" Королевского метеорологического института, Бельгия; Владимиру Александровичу Сапунову, ведущему разработчику и руководителю Лаборатории квантовой магнитометрии УрФУ, г. Екатеринбург; Йоахиму Линсу, магнитологу обсерватории "Niemegk" Центра Гельмгольца, Потсдам, Германия; Павлу Борисовичу Бородину, магнитологу, и Олегу Александровичу Кусонскому, заведующему обсерваторией "Арти" ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург; Зинаиде Филипповне Думбрава, заведующей обсерваторией "Хабаровск" ИКИР ДВО РАН; Алексею Юрьевичу Гвоздареву, заведующему кафедрой физики Горно-Алтайского госуниверситета. Особая благодарность выражается Владимиру Валерьевичу Кузнецову, в прошлом заведующему Геофизической обсерваторией "Ключи" ОИГГиМ СО РАН, г. Новосибирск, совместная работа с которым в течение многих лет оказала знаковое влияние на научные и прикладные интересы автора.

***Представленная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-55-45007.***



1. Введение.....	5
1.1. Принципы и подходы, заложенные в разрабатываемое ПО.....	7
1.2. Общая структура ПО.....	11
2. Обработка результатов абсолютных наблюдений.....	16
2.1. Этапы обработки результатов абсолютных наблюдений и вычисления базисных значений.....	21
2.1.1. Первичная обработка результатов абсолютных наблюдений.....	22
2.1.2. Вычисление базисных значений.....	31
2.1.1.1. Базисные значения FDI-вариометра.....	31
2.1.1.2. Визуализация результатов вычислений, получение Adopted-базисных значений.....	35
2.1.1.3. Отступление I. Принятые базисные значения и скачки.....	39
2.1.1.4. Базисные значения HDZ-вариометра.....	42
2.1.1.5. Визуализация результатов вычислений, получение Adopted-базисных значений.....	48
2.1.1.6. Отступление II. Удаление единичных выбросов.....	52
2.1.1.7. Отступление III. Наводки со стороны GSM-90.....	53
2.1.1.8. Базисные значения для вариометра, установленного в XYZ-ориентации.....	54
2.1.1.9. Отступление IV. Проблема оценки базисного значения F0.....	58
3. Обработка непрерывных магнитных измерений.....	61
3.1. Обработка измерений на примере феррозондового HDZ-вариометра FGE.....	62
3.1.1. Общая оценка первичных данных за сутки.....	62
3.1.2. Отступление V. Удаление документированных помех.....	69
3.1.3. Отступление VI. Удаление помех от ионозонда.....	71
3.1.4. Вычисление минутных данных.....	74
3.1.5. Контроль полученных файлов и публикация.....	77
3.1.6. Отступление VII. Коррекция секундных данных.....	79
3.1.7. Отступление VIII. Вычисление минутных значений.....	81
3.1.8. Подготовка квази-окончательных данных.....	85
4. Подготовка окончательных (Definitive) данных.....	90
4.1. Вычисление минутных значений.....	92
4.2. Вычисление принятых (Adopted) базисных значений.....	93
4.3. Вычисление полных значений составляющих поля.....	96
4.4. Запись минутных данных в месячные бинарные файлы.....	96
4.5. Запись в месячные бинарные файлы значений локальных K-индексов.....	99
4.6. Контроль бинарных (IAF) файлов.....	99
4.7. Вычисление среднегодовых значений поля.....	100
4.8. Окончательная подготовка и контроль файла базисных значений.....	103
4.9. Детальная проверка данных, корректировка при необходимости.....	105
4.10. Отступление IX. Вычисление средних значений при пропусках в исходных данных ("правило 90%").....	108
4.11. Заполнение пропусков в данных Definitive.....	113

## 1. Введение

Магнитное поле Земли — важнейшая глобальная характеристика нашей планеты, в которой находят отражение многие процессы, протекающие как глубоко в её недрах, так и в верхних оболочках — в ионосфере и магнитосфере. Эти процессы приводят к вариациям поля в широком диапазоне характерных времён — от десятков Гц до интервалов, сравнимых с возрастом Земли. Пространственная неоднородность также характеризуется большим разбросом масштабов — от сотен метров до размеров планеты.

Для наблюдения за этими пространственно-временными изменениями используются различные системы:

- наземные системы - специальные магнитные обсерватории, на которых получают информацию о полном векторе магнитного поля, магнитные станции, ориентированные преимущественно на регистрацию быстрых вариаций, пункты векового хода, измерения на которых позволяют заполнять достаточно редкую пространственную сеть обсерваторий;
- специальные съемки разной степени плотности, включая аэромагнитную и морскую;
- магнитные измерения на борту космических орбитальных аппаратов, позволяющих получить однородную картину пространственного распределения магнитного поля Земли.

Современные магнитные обсерватории объединены в глобальную сеть — INTERMAGNET ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)), в которой заданы стандарты на виды магнитных измерений, их частоту, точность, форматы данных, оперативность и формы представления информации (публикации результатов) и пр. Не будем здесь описывать магнитное поле Земли и методические и аппаратные особенности измерений на обсерваториях — это прекрасно сделано в ряде монографий и руководств, например, (Jankowski J. and Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. – Warsaw, 1996. – 235 p.; Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2006. – 140 с.; INTERMAGNET Technical Reference Manual. Version 4.6, St-L. Benoit (Eds.), Edinburgh, 2012, 92 p.) и в книгах общего характера (Яновский Б.М. Земной магнетизм. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. - 592 с.; Паркинсон У. Введение в геомагнетизм: Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 528 с; Geomagnetism. M.Kano (Vol. Editor). - ser. Treatise on Geophysics. Vol.5 – Elsevier, 2009. - 700 p.), основное внимание сосредоточим на обработке магнитных данных.

Обработка данных является неотъемлемой частью магнитного мониторинга. В последние годы отмечается значительное улучшение в его организации и проведении. Это связано как с прогрессом в области разработки и производства цифровых магнитометров соответствующего класса точности, так и с достижениями в системах коммуникаций. Всё это позволяет оснастить обсерватории современными приборами и обеспечить передачу полученных результатов в центры данных и оперативный доступ к ним со стороны научного сообщества. Однако наблюдаются очевидные проблемы, связанные с сокращением возможностей работы с первичными данными непосредственно на обсерваториях, например, из-за отсутствия квалифицированного персонала. Это ведёт к тенденции передавать значительную часть функций магнитных обсерваторий в центры сбора данных, при этом качество получаемых данных заметно снижается (см, например, Linthe H.-J., Reda J., Isac A., Matzka J., Turbitt C.W. Observatory Data Quality Control – the instrument to ensure valuable research // XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments and Data Processing, Cadiz, Spain, 4-14 June 2012. 173-177). Еще более серьезная проблема — отсутствие доступного, удобного и дружески ориентированного программного обеспечения для обработки первичных данных на обсерваториях, что во многих случаях ограничивает возможности обсерваторий готовить данные стандарта INTERMAGNET в статусе Quasi-definitive и Definitive или повышать их качество в on-line режиме.

Известны некоторые программные пакеты, которые уже функционируют на магнитных обсерваториях. Например, пакет программ, разработанный обсерваторией "Нимер" (GFZ,

Potsdam, Germany) и поставляемый вместе с комплектом магнитометров FGE и GSM-90 и аппаратным регистратором MAGDALOG, используется на многих обсерваториях в мире, в т.ч. на обсерваториях CSIR-NGRI (Индия) и некоторых российских. Ограничения этого пакета — жесткая привязка к аппаратным средствам, небольшой функциональный набор и невозможность его развития в условиях пользователя, поскольку пакет представляет собой набор исполняемых модулей. Можно отметить также пакет GDASView (Geomagnetic Data Acquisition System), разработанный Британской геологической службой (British Geology Survey, BGS) для обработки данных, получаемых в системе INDIGO (стандарты данных в сети магнитных обсерваторий BGS и оборудования, установленного BGS в других обсерваториях, см., например, Ellen Clarke, Orsi Baillie, Sarah J. Reay, Chris W. Turbitt A method for the near real-time production of quasi-definitive magnetic observatory data // Earth Planets Space, 2013, 65, 1363–1374). Пакет разработан на платформе Java, позволяет расширение для различных форматов файлов с результатами измерений и удалённую работу с данными обсерваторий из единого центра сбора и управления. Одной из современных разработок является пакет MagPy (обсерватория "Conrad", Австрия, <https://github.com/geomagpy/magpy>), реализованный в системе Python и ориентированный на решение типичных задач по обработке данных на магнитных обсерваториях. Особо можно отметить прекрасное средство для просмотра, контроля и конвертации магнитных данных статуса Definitive - пакет INTERMAGNET Data Viewer (British Geological Survey) на платформе Java.

## 1.1. Принципы и подходы, заложенные в разрабатываемое ПО

Многолетняя практическая работа автора с результатами, получаемыми при мониторинге магнитного поля на обсерваториях, приводила к необходимости иметь удобное средство для их обработки и анализа. Постепенно формировались приоритеты в выборе среды для написания программ, принципы построения и структура — при этом важнейшим критерием была оптимальность и эффективность обработки реальных данных именно в условиях обсерватории. В качестве программной оболочки выбран математический пакет MATLAB (или его близкий аналог Octave). Пакеты представляют среду, в которой запускаются скрипты. Достоинством здесь является то, что программы-скрипты представляют собой файлы в текстовом формате и могут быть модифицированы на каждой обсерватории в соответствии с конкретной ситуацией. Пакеты имеют расширенные возможности работы графикой, что во многих случаях является очень важным фактором. Также предоставляются стандартные наборы по чтению-записи файлов различных форматов, оптимизированные средства для работы с большими массивами данных непосредственно в памяти компьютера. В данном ПО обработка выполняется в командном окне MATLAB (Octave), без использования специализированных visual-приложений.

Опыт практической работы на магнитных обсерваториях, стандарты и руководства по ведению магнитной службы и общение с коллегами позволили выделить некоторые принципы, которые могут составить методическую основу ПО для обсерваторий:

*1) обработка результатов измерений должна выполняться в оперативном режиме, непосредственно на обсерватории и силами сотрудников обсерватории (магнитологами).*

Такой подход позволяет оперативно обнаруживать проблемы с магнитными измерениями, оперативно оценивать ситуацию на обсерватории и принимать адекватные и эффективные решения. Основная проблема, которая возникает — отсутствие квалифицированных кадров. Тем не менее, если обсерватория соответствует стандартам INTERMAGNET, то есть ведёт

контроль базисных значений вариометров, то определенный персонал с достаточной квалификацией имеется;

*2) исходной информацией при подготовке данных любого статуса должны быть первичные данные, создание и использование файлов с промежуточными данными необходимо сводить к минимуму*

Достаточно распространенной практикой при обработке результатов магнитных измерений (рассматриваем обычный процесс — получение минутных данных того или иного ранга) является создание множества промежуточных файлов, после выполнения той или иной процедуры. Например, применение температурных поправок к исходным данным в файле file0 приводит к созданию file1, последующее удаление помех — к file2, учет базисных значений — к file3 и т.д. Альтернативным вариантом может быть использование сквозной обработки, где каждая процедура (учет температуры, получение полных компонент и т.п.) является одним из последовательных и обязательных этапов работы программы. Условно говоря, промежуточные файлы создаются в оперативной памяти компьютера, а во внешний файл выводятся только итоговые результаты. Вся информация, которая необходима для выполнения процедур, заносится в специальные инициализационные или в пополняемые файлы параметров, откуда при обработке считывается программой;

*3) результатом оперативной обработки измерений должны быть данные, по статусу близкие к quasi-definitive, то есть с учетом реальных базисных значений и отбраковкой помех*

Ориентация на такой подход предполагает получение высокостатусных данных в оперативном режиме. Отсюда вытекают некоторые важные положительные моменты:

- получение текущих базисных значений (Adopted) выполняется практически сразу после абсолютных наблюдений, то есть обеспечивается оперативный контроль качества абсолютных наблюдений и состояния базисных линий;

- получение полного вектора поля по измерениям различными вариомерами позволяет эффективно сравнивать разнородные данные, практически один в один, и быстро обнаруживать возможные проблемы;

- при проблемах с основным магнитометром пропуски в его измерениях достаточно легко заполняются данными резервного прибора простой заменой фрагментов содержимого в файлах минутных данных (форматов IMF или IAGA2002);

- полученные таким образом данные статуса Reported позволяют быстро получать как данные quasi-definitive, так и definitive;

*4) на всех этапах обработки должна быть обеспечена максимальная визуализация данных*

Визуализация результатов измерений и обработки является мощным средством при работе с большими объемами данных. Штатные средства пакетов MATLAB и OCTAVE предоставляют различные сервисные функции при работе с графикой: масштабирование, выделение, маркировка, снятие координат точки и т. п., которые максимально задействованы в используемых программах.

Графические возможности программы обработки направлены на:

- упрощение восприятия сложных графиков (например, несколько кривых на одной панели);
- выделение (цветом, маркерами) проблемных мест в данных, удаленных фрагментов записи;
- масштабирование графиков для детализации и снятия информации непосредственно с кривых.

Методика обработки магнитных данных на обсерваториях определяется логикой последовательности преобразований, которые необходимо применить к результатам измерений, и составом данных, ожидаемых в результате обработки. С той или иной детализацией это отражено в упомянутых выше руководствах по ведению магнитной службы. В целом этапы обработки показаны на рис. 1 и включают:

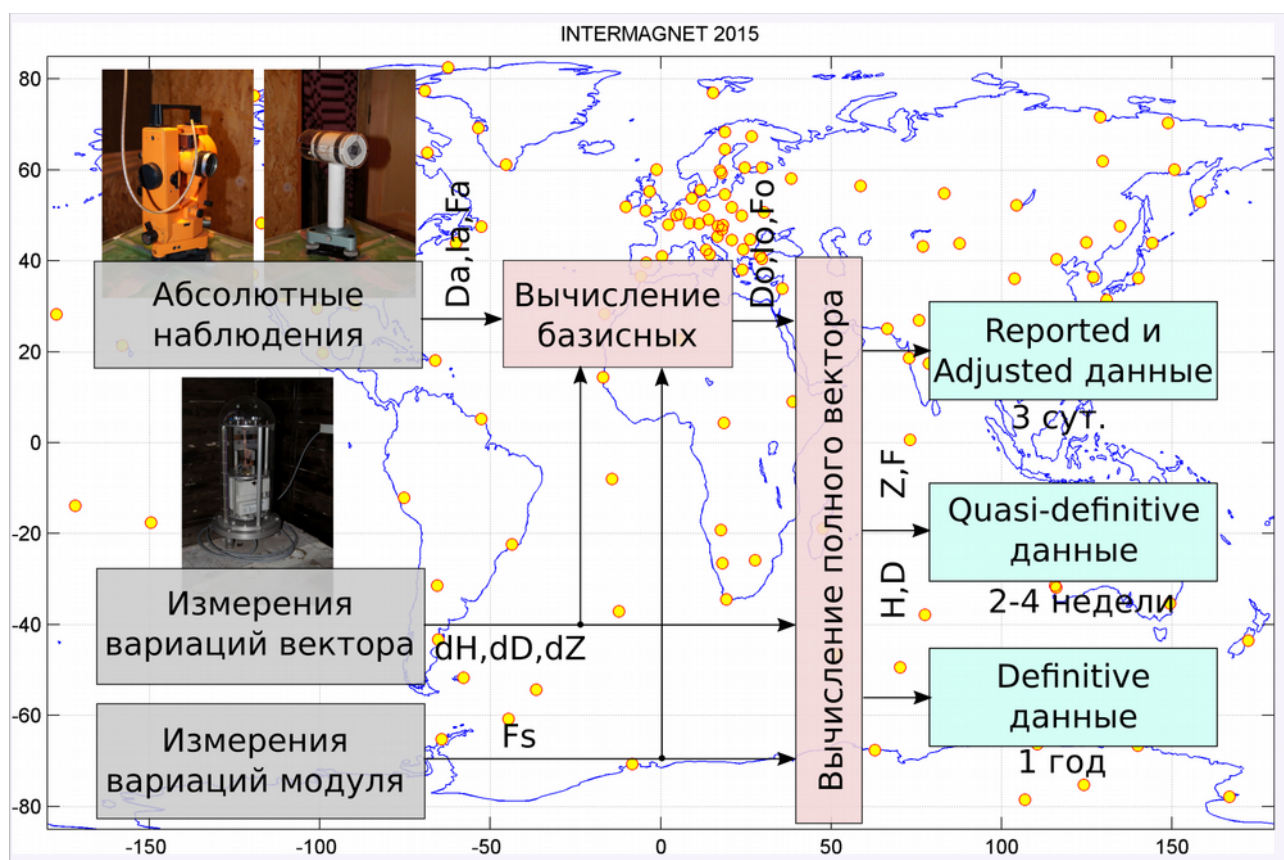


Рис. 1. Общая схема обработки магнитных данных на обсерватории.

- абсолютные наблюдения и вычисление базисных значений вариационных магнитометров;
- непрерывные измерения вариаций поля и вычисление минутных значений полного вектора магнитного поля различных статусов INTERMAGNET (Adjusted, Quasi-definitive и Definitive).

Как пример, на рис. 2 представлена блок-схема обработки результатов непрерывных измерений магнитометрами FGE и GSM-90 на обсерватории "Паратунка", включая обработку результатов абсолютных наблюдений. Выходной итоговой информацией являются суточные файлы минутных значений, фактически имеющие статус Adjusted.

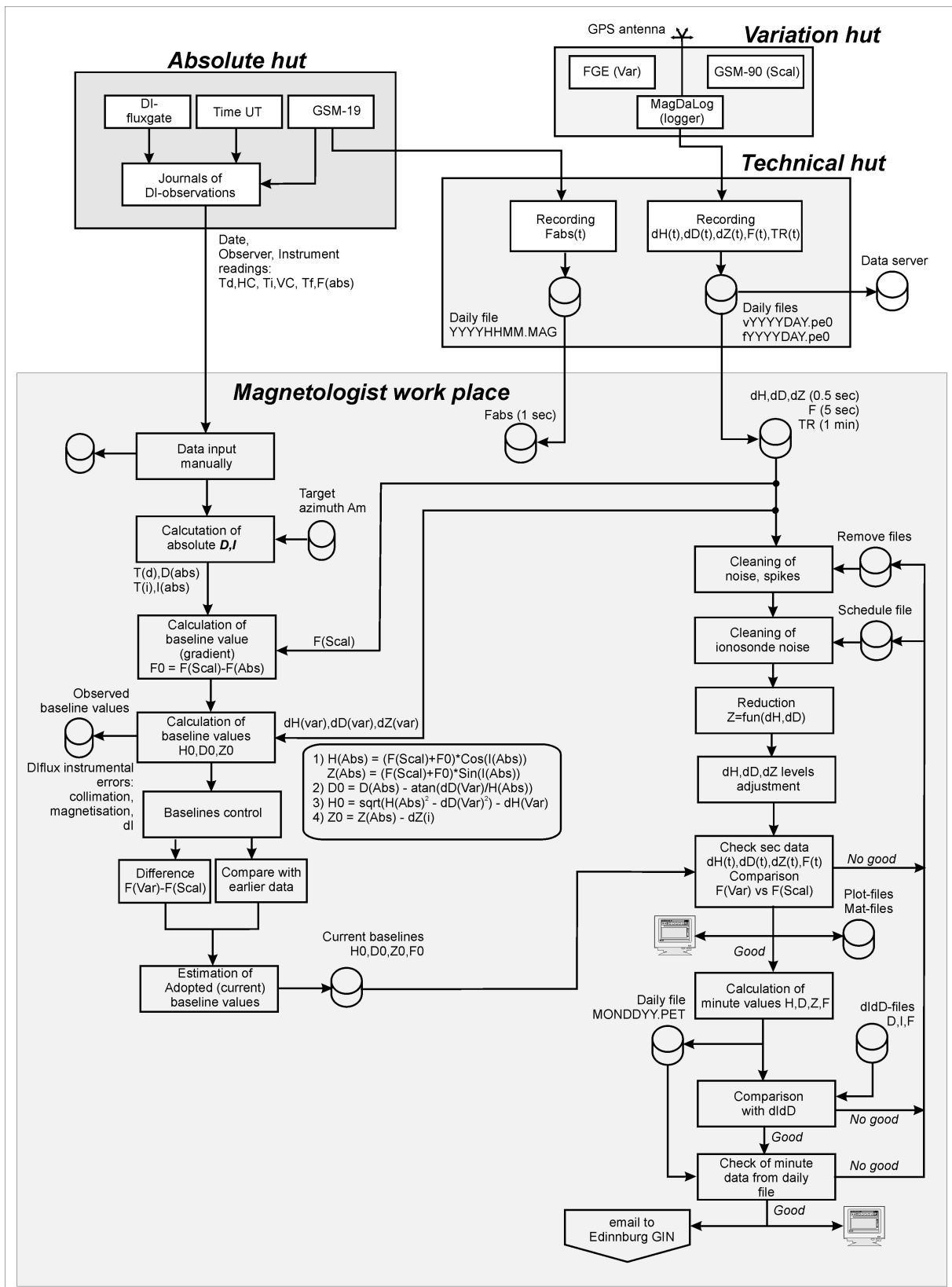


Рис. 2. Блок-схема обработки данных магнитометров FGE и GSM-90 на обсерватории "Паратунка".

## 1.2. Общая структура ПО

Для эффективности и оптимальности программного обеспечения при использовании на

разных обсерваториях и при работе с различными данными желательна его унификация и стандартизация. В нашем случае это достигается использованием стандартной структуры программ и модулей и, при возможности, одних и тех же модулей при работе с различными данными. Отличие обычно возникает на уровне считывания первичных файлов с результатами измерений, а дальнейшие этапы обработки практически идентичны. В табл.1 приводятся фрагменты структуры каталогов для обработки данных обсерваторий "Паратунка", "Мыс Шмидта" и "Хабаровск".

**Таблица 1. Структура каталогов для обработки данных обсерваторий "Паратунка", "Мыс Шмидта" и "Хабаровск"**

обсерватория	уровень 1	уровень 2	годы	файлы	
Paratunka	Data	Abs_Data	2017	DIF_20170101.dat, ..., DIF_20171231.dat	
			2018	DIF_20180101.dat, DIF_20180102.dat, ...	
		didd	2017	20170101.mag, ..., 20171231.mag	
			2018	20180101.mag, 20180102.mag, ...	
		FGE_GSM	2017	v2017001.pe0, ..., v2017365.pe0 f2017001.pe0, ..., f2017365.pe0	
		dIdD	data_IAGA2002	2017	PET20170101pmin.min, ..., PET20171231pmin.min
				2018	PET20180101pmin.min, PET20180102pmin.min, ...
			Data_IMN	2017	JAN0117.pet, ..., DEC3117.pet
				2018	JAN0118.pet, JAN0218.pet, ...
	DI			blv_dIdD.dat, blv_all_dIdD.dat, dFgrad_obs_dIdD.dat, blv_sensor_dIdD.dat dif_hms_pet.m, base_calc_didd.m, base_plot_didd.m	
	Graphs		2017	20170101_DpDmIpIm.png, 20170101_FdbdI.png, 20170101_HDZ.png, ..., 20171231_DpDmIpIm.png, 20171231_FdbdI.png, 20171231_HDZ.png	
			2018	20180101_DpDmIpIm.png, 20180101_FdbdI.png, 20180101_HDZ.png, 20180102_DpDmIpIm.png, 20180102_FdbdI.png, 20180102_HDZ.png	
	Mat		2017	didd_20170101.mat, ..., didd_20171231.mat	
			2018	didd_20180101.mat, didd_20180102.mat , ...	
				didd_process.m, didd_process_min.m, didd_var_read_fun.m, f_compare.m, imag_read_pet.m, hdzf_hour_out_pet_didd.m	
	FGE_GSM		data_IAGA2002	2017	PET20170101qmin.min, ..., PET20171231qmin.min
		2018		PET20180101qmin.min, PET20180102qmin.min, ...	
		Data_IMN	2017	JAN0117.pet, JAN0117_XYZF.pet, ..., DEC3117.pet, DEC3117_XYZF.pet	
			2018	JAN0118.pet, JAN0118_XYZF.pet, JAN0218.pet, JAN0218_XYZF.pet, ...	
		DI		blv_all_fge.dat, blv_fge.dat, blv_sensor_fge.dat, dFgrad_obs_fge.dat dif_hms_pet.m, base_calc_fge.m, base_plot_fge.m	
		Graphs	2017	20170101_dF(FGE- GSM).png, 20170101_dHdbdZ.png, 20170101_F(FGE)_F(GSM).png, 20170101_FGE_2Hz.png, 20170101_HDZ.png, ..., 20171231_dF(FGE- GSM).png, 20171231_dHdbdZ.png, 20171231_F(FGE)_F(GSM).png, 20171231_FGE_2Hz.png, 20171231_HDZ.png	
			2018	20180101_dF(FGE- GSM).png, 20180101_dHdbdZ.png, 20180101_F(FGE)_F(GSM).png, 20180101_FGE_2Hz.png, 20180101_HDZ.png	
		Mat	2017	fge_gsm_20170101.mat, ..., fge_gsm_20171231.mat	

Обсерватория	уровень 1	уровень 2	годы	файлы	
			2018	fge_gsm_20180101.mat, fge_gsm_20180102.mat, ...	
				fge_process.m fge_process_min.m imag_read_all.m remove_radio_generation_fun.m remove_radio_noise_fun.m scalar_gsm_head_read_fun.m scalar_gsm_read_fun.m scalar_min_head_read_fun.m scalar_min_read_fun.m var_fge_head_read_fun.m var_fge_read_fun.m varmin_head_read_fun.m varmin_read_fun.m xyzf_hour_out_fge.m	
	Ini_parameters			base_jumps_dIdD.dat base_jumps_FGE_GSM.dat Baseline_current_dIdD.dat baseline_current_fge.dat dFgrad_current_dIdD.dat dFgrad_current_fge.dat Radio_Sessions.dat Remove_dIdD.dat Remove_FGE_HDZ_2017.dat Remove_FGE_HDZ_2018.dat didd_ini.m fge_ini.m IAGA2002_header_PET_FGE.txt IAGA2002_header_PET_FGE_QD.txt	
	INTERMAGNET_DVD	Baselines	dIdD		PET2016.blv
			FGE		PET2016.blv
		CD	PET		
			2015 2016		PET16Jan.bin PET16Feb.bin PET16Mar.bin PET16Apr.bin PET16May.bin PET16Jun.bin PET16Jul.bin PET16Aug.bin PET16Sep.bin PET16Oct.bin PET16Nov.bin PET16Dec.bin PET2016.blv yearmean.pet
		Var_min FGE		v20160101_Z(HD).mat, ..., v20161231_Z(HD).mat	
	Cape_Schmidt	Data	Abs_Data	2015	DIF_20150329.dat, ..., DIF_20150806.dat
			dIdD	2017	20170101.mag, ..., 20171231.mag
2018				20180101.mag, 20180102.mag, ...	
Magdas			2017	M170101.CST, M171231.CST, ..., S170101.CST, S171231.CST	
			2018	M180101.CST, S180101.CST, M180102.CST, S180102.CST	
POS		2017	POS_2017.001 POS_2017.362		
dIdD		data_IAGA2002	2017	CPS20170101pmin.min CPS20171231pmin.min	
			2018	CPS20180101pmin.min CPS20180102pmin.min	
		Data_IMN	2017	JAN0717.cps DEC3117.cps	
			2018	JAN0118.cps JAN0218.cps	
		DI		blv_all_dIdD.dat blv_dIdD.dat blv_sensor_dIdD.dat dif_hms_cps.m base_calc_didd_cps.m base_plot_didd_cps.m	
		Graphs	2017	20170101_DpDmIpIm.png 20170101_FdIdD.png 20170101_HDZ.png 20170101_POS_vs_dIdD.png, ... 20171231_DpDmIpIm.png 20171231_FdIdD.png 20171231_HDZ.png	
			2018	20180101_DpDmIpIm.png 20180101_FdIdD.png 20180101_HDZ.png	
		Mat	2017	dIdD_20170101.mat dIdD_20170101_min.mat dIdD_20171231.mat dIdD_20171231_min.mat dIdD_POS_20170101.mat dIdD_POS_20171231.mat	
2018			dIdD_20180101.mat dIdD_20180101_min.mat dIdD_POS_20180101.mat		
				didd_process_calc.m didd_process_calc_min.m didd_calc_fun.m hdzf_hour_out_cps_didd.m	
MAGDAS		data_IAGA2002	2017	CPS20170101pmin.min, ..., CPS20171231pmin.min	
			2018	CPS20180101pmin.min CPS20180103pmin.min	
		Data_IMN	2017	JAN0117.cps JAN0117_XYZF_MagDas.cps, ..., DEC3117.cps DEC3117_XYZF_MagDas.cps	
			2018	JAN2018.cps JAN2018_XYZF_MagDas.cps	



Обсерватория	уровень 1	уровень 2	годы	файлы
		DI		blv_magdas.dat blv_all_magdas.dat blv_sensor_magdas.dat base_calc_magdas_cps.m base_plot_magdas_cps.m
		Graphs	2017	20170101_dHdDz.png 20170101_Temperature_Tilt.png, ... 20171231_dHdDz.png 20171231_Temperature_Tilt.png
			2018	20180101_dHdDz.png 20180101_Temperature_Tilt.png
		Mat	2017	MagDas_20170101.mat MagDas_20171231.mat MAGDAS_POS_20170101_min.mat MAGDAS_POS_20171231_min.mat
			2018	MagDas_20180101.mat MagDas_20180102.mat MAGDAS_POS_20180101_min.mat MAGDAS_POS_20180103_min.mat
			magdas_process_jump.m imag_read_cps.m one_minute_mean_magdas.m magdas_timer_correct.m xyzf_hour_out_magdas.m	
ini_parameters			base_jumps_dIdD.dat Baseline_current_dIdD.dat baseline_current_magdas.dat dFgrad_current_dIdD.dat dFgrad_current_POS.dat Jumps_dIdD.dat Jumps_magdas.dat didd_ini_cps.m magdas_ini_cps.m pos_ini_cps.m	
Khabarovsk	Data	Abs_Data	2017	DIF_20170102_old.dat, ..., DIF_20171229_old.dat
			2018	DIF_20180102_old.dat, DIF_20180105_old.dat, ...
		CMVS	2017	ik170101.418, ..., ik171231.418
			2018	ik180101.418, ik180102.418, ...
		GSM-19W	2017	gsm20170101.txt, ..., gsm20171231.txt
			2018	gsm20180101.txt, gsm20180102.txt, ...
	CMVS	Data_IMN	2017	JAN0117.khb, ..., DEC3117.khb
			2018	JAN0118.khb, JAN0218.khb, ...
		DI		blv_CMVS.dat, BLV_all_CMVS.dat, BLV_sensor_CMVS.dat dif_hms.m, base_calc_cmvs.m, base_plot_cmvs.m
		Graphs	2017	20170101_dHdDz.png, 20170101_F(Var-MMP).png, 20170101_HDZ.png, 20170101_TR.png, 20171231_dHdDz.png, 20171231_F(Var-MMP).png, 20171231_HDZ.png, 20171231_TR.png
			2018	20180101_dHdDz.png, 20180101_F(Var-MMP).png, 20180101_HDZ.png, 20180101_TR.png
		Mat	2017	CMVS_20170101.mat, ..., CMVS_20171231.mat, CMVS_var_20170101.mat, ..., CMVS_var_20171231.mat
			2018	CMVS_20180101.mat, CMVS_var_20180101.mat
	ini_parameters			base_jumps_cmvs.dat Baseline_current_CMVS_KHB.dat Conversion_CMVS.dat dFgrad_current_GSM19W_KHB.dat Remove_DHZ_CAIS_KHB.dat Remove_DHZ_CMVS_KHB.dat Remove_T_CMVS_KHB.dat Remove_TR_CMVS_KHB.dat cmvs_ini_khb.m pos_ini_khb.m
	Intermagnet_DVD	Baselines	dIdD	KHB2016.blv
CMVS			KHB2012.blv	
CD		KHB 2015 2016	KHB16Jan.bin KHB16Feb.bin KHB16Mar.bin KHB16Apr.bin KHB16May.bin KHB16Jun.bin KHB16Jul.bin KHB16Aug.bin KHB16Sep.bin KHB16Oct.bin KHB16Nov.bin KHB16Dec.bin KHB2016.blv Readme.khb Yearmean.khb	

обсерватория	уровень 1	уровень 2	годы	файлы
			Var_min dIdD CMVS	dIdD_Var_POS1_20160101.mat,..., dIdD_Var_POS1_20161231.mat c120101.mat,...,c121231.mat

На уровне "Обсерватория" создаётся каталог для конкретной обсерватории, при этом на одном ПК можно вести обработку данных нескольких обсерваторий. "Уровень 1" задаёт каталоги для магнитометров, например, "dIdD", "FGE\_GSM", "Magdas", "CMVS" (ЦМВС "Кварц"), для данных "Data", для инициализирующих скриптов и параметров инструментов "ini\_parameters", для подготовки данных Definitive "INTERMAGNET\_DVD" и т. д. Настройка путей для обработки данных конкретного магнитометра выполняется скриптами в папке \ini\_parameters, в качестве примера содержимое такого скрипта **fge\_ini.m** для магнитометра FGE обсерватории "Паратунка" показано ниже:

```
% основные инициализационные параметры
```

```
global path_all
```

```
% добавляем основную рабочую папку для обработки Паратунки
% в конец путей MatLab (зависит от конкретного PC)
path(pathdef) % восстанавливаем пути по умолчанию
addpath 'd:\Paratunka\FGE_GSM' -end
```

```
% всем путям предшествует глобальный каталог (зависит от PC)
path_all='d:\Paratunka\';
```

```
% каталог с данными абсол. наблюдений
path_data_DI=[path_all 'Data\Abs_Data\']; % далее - YYYY\DIF_YYYYMMDD.dat
```

```
% каталоги с исходными данными FGE и GSM
path_data_fge=[path_all 'data\FGE_GSM\momwe\fge\']; % вариометр FGE
path_data_gsm=[path_all 'data\FGE_GSM\momwe\gsm\']; % протонный GSM в вариаци. пав-не
```

```
% среднегодовые значения поля (по оценкам в октябре 2012 г.)
H_year=21670; Z_year=47000; F_year=51750;
D_year=-(5+55/60); I_year=65+15/60; % в угл.мин.
% уровни для рисования графиков
FF=51000; HH=21000; ZZ=46000; DD=-6; II=65; XX=21000; YY=-2000;
```

```
% периодичность измерения FGE и GSM (секунд)
dt_fge=0.5;
dt_gsm=5;
```

```
% кол-во точек, которые берём в интервале без помехи от GSM
% nr_fge=1; % 1 точку в момент измерения GSM
nr_fge=3; % 1 точку в момент измерения GSM и еще 2 следующих
```

```
% принятый азимут Мира
% A_astr=dms_deg(209,52,54.0); % main pillar "fDI" - старые данные
% A_astr=dms_deg(209,48,35.0); % по астроном. набл. Солнца со штатива 10.09.2012
A_astr=dms_deg(209,48,56); % по измерениям 8 и 12 февраля 2013 г.
```

```
% амплитуда единичного выброса в данных GSM (нТ),
% который будет заменен на NaN
dF_spike_lim=5;
```

```
% Температурные коэффициенты FGE (H,Z - в нТл/С, D - в град./С)
% Hcorr=Nobs-KtH*(TR-TR0)
KtH=-0.08; KtZ=-0.20; KtD=-0.13/60;
% Температура приведения (нулевой поправки)
TR0=10;
```

```
% Матрица коэфф. лин. зависимости между компонентами
% dZ = R(3,1)*dH + R(3,2)*dD
% компоненты - вариации в нТл, оценка по сравнению с dIdD 29.06.2013
% и по F(FGE)-F(GSM) - минимизация
%      H      D      Z
R=[+1.0000 +0.0000 +0.0000;
   +0.0000 +1.0000 +0.0000;
   +0.0130 -0.0050 +1.0000];
```

% Средние вариации (по данным за 01-31 мая 2013 г)  
dHmean=-130; dDmean=-460; dZmean=+205;

При обработке данных FGE запускается соответствующий скрипт, например, `fge_process` (для суточной обработки), первой командой которого является вызов `fge_ini.m`. При этом список путей MATLAB сбрасывается в исходное состояние и дополняется каталогами с данными FGE и GSM-90 и рабочим каталогом, также выполняется инициализация постоянных и параметров, необходимых при обработке. Это позволяет избежать конфликтов при переходе на обработку данных другого магнитометра или другой обсерватории.

Кроме того, существует специальный каталог, в котором собраны все функции общего назначения, которые могут понадобиться при обработке. Этот каталог заносится в постоянный список путей MATLAB.

## 2. Обработка результатов абсолютных наблюдений

Абсолютные наблюдения, обработка их результатов и получение базисных значений вариационных магнитометров является важнейшим элементом мониторинга магнитного поля на обсерватории. Высокие требования к надежности и достоверности получаемых данных связаны с несколькими обстоятельствами:

1) абсолютные наблюдения выполняются вручную и они достаточно трудоёмки. Поэтому в целом количество таких наблюдений не велико и потери (из-за ошибок при наблюдениях или при обработке) даже незначительного количества абсолютных данных может существенно сказаться на качестве итоговых данных;

2) абсолютные наблюдения обеспечивают достоверность итоговых данных обсерватории на длительных интервалах времени. Соответственно, любые погрешности, которые не могут быть явным образом распознаны, будут трактоваться как естественные изменения поля. Изменения магнитной обстановки в окрестности абсолютного павильона, используемых магнитометров, смена наблюдателей на длительных временных интервалах весьма вероятны;

3) достоверность результатов абсолютных наблюдений достаточно сложно контролировать. Во многих случаях обсерватории имеют только один комплект абсолютных магнитометров, т. е. отсутствует возможность взаимного сравнения. Такие характеристики, как неизменность азимута удалённого репера (Миры), используемого для определения склонения, стабильность распределения магнитного поля в абсолютном павильоне, личные ошибки наблюдателей и т. п. являются чрезвычайно важными и при этом практически неподдающиеся контролю.

Обработка абсолютных наблюдений зависит от различных обстоятельств, например, от *используемого метода*. Наиболее распространённый метод наблюдений — *нуль-метод*, при котором фиксируется момент времени и положение феррозондового датчика fDI-магнитометра в пространстве (отсчёты по горизонтальной или вертикальной шкалам теодолита), при котором ось датчика перпендикулярна вектору магнитной индукции. Однако, часто используется и *офсетный метод*, при котором фиксируется момент времени и отсчёт на дисплее электронного блока fDI при заданном положении датчика (зрительной трубы). Эти методы существенно различаются как по наблюдениям, так и по обработке результатов.

Различие при обработке, хотя и не столь существенное, возникает *при использовании теодолитов со шкалой вертикального и горизонтального кругов в градусах или в градах (гонах)*. Обычно обработка связана с конкретным абсолютным fDI на обсерватории, а результаты (отсчёты) нечастых измерений на приборе с альтернативной шкалой могут быть просто предварительно пересчитаны в требуемый формат при сохранении остальной части обработки.

Обработка также может изменяться в зависимости от технологии (последовательности действий) при наблюдениях, которые могут быть разными на разных обсерваториях. Например, это может быть различие в последовательности положений трубы с датчиком сверху или снизу, например, могут использоваться последовательности положений 3+В+3-В- или 3+В-3-В+, где "+" и "-" означают положение датчика сверху и снизу зрительной трубы, соответственно. На некоторых обсерваториях практикуется снятие нескольких отсчётов подряд при одном и том же положении датчика.

Большое разнообразие вариантов обработки создаётся *различием вариационных магнитометров*, для которых вычисляются базисные значения. Например, в случае dIdD-магнитометра можно говорить о наиболее простой схеме вычислений, т. к. вариации dDv, dIv и Fv, которые регистрируются этим магнитометром, напрямую сопоставляются с результатами абсолютных наблюдений Da, Ia и Fa, т. е. базисные значения вычисляются очень просто:  $D_0=Da-dDv$ ,  $I_0=Ia-dIv$ ,  $F_0=Fa-Fv$ . При этом абсолютные измерения D, I, F могут быть разнесены по времени, что соответствует реальной практике.

На рис.3 представлена обобщённая схема вычисления базисных значений  $D_0$ ,  $I_0$  и  $F_0$  для вариационного магнитометра dIdD GSM-19FD. Здесь (и в дальнейшем) слева на рисунке (красным фоном) показаны результаты абсолютных измерений склонения Da, наклонения Ia и модуля Fa, справа — результаты вариационных измерений склонения dDd, наклонения dIi и модуля Fv (голубой фон). Зелёным фоном показаны результаты вычислений. Предполагается, что горизонтальный уровень отметок непосредственно измеренных величин соответствует времени абсолютных наблюдений склонения (верхний уровень, для обозначения используется символ "d"), наклонения (второй уровень сверху, используется символ "i") и модуля (третий уровень). Также предполагается, что абсолютные измерения F выполняются отдельным скалярным магнитометром, который устанавливается на место fDI-магнитометра после завершения D,I-измерений.

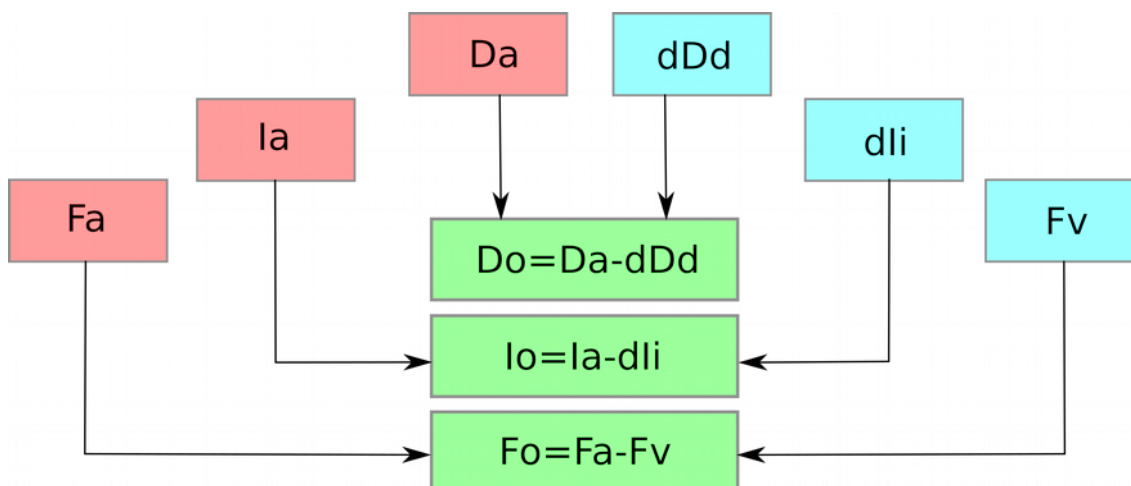


Рис. 3. Схема вычисления базисных значений  $D_0$ ,  $I_0$  и  $F_0$  вариационного магнитометра dIdD.

Более сложная схема получается для HDZ-ориентированного вариометра (наиболее распространённая схема, из-за простоты установки магнитометра), см. рис.4. Вычисление базисного значения склонения  $D_0=Da-dDv$  не вызывает сложностей. Однако, для вычисления  $H_0=Ha-dHv$  и  $Z_0=Za-dZv$  потребуется одновременное по времени определение Ia и Fa, при том, что, строго говоря, эти измерения должны быть сделаны и в одном и том же месте.

Еще более сложный вариант будет при XYZ-установке вариометра, который привлекателен тем, что расчёты полных составляющих поля по базисным и вариациям не требуют учёта ухода оси H с направления на магнитный север (рис.5). Для вычисления  $X_0=Xa-dXv$  и  $Y_0=Ya-dYv$  требуется знать Da, Ia и Fa одновременно и в одной точке. Поскольку это невозможно, требуются некоторые допущения и дополнительные вычисления, т. е. появляются источники дополнительных ошибок.

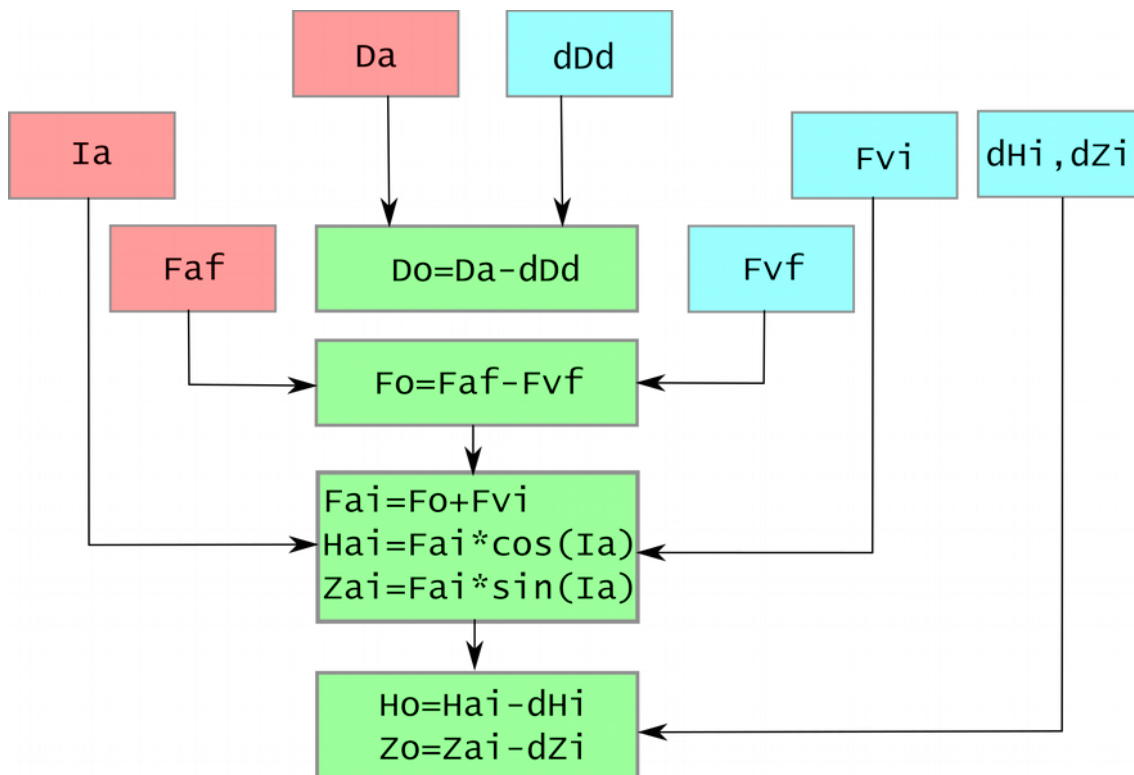


Рис. 4. Схема вычисления базисных значений  $H_0$ ,  $D_0$  и  $Z_0$  для вариометра, ориентированного в HDZ-системе

Различие вычислительных схем также возникает в зависимости от *способа измерения модуля поля*. В "классической" методике магнитных измерений на обсерваториях используется два скалярных магнитометра:

- 1) для непрерывной записи, т. е., по сути вариометр, измеряющий вариации  $F$ . Магнитометр м.б. установлен в любом месте, но во многих случаях устанавливается в вариационном павильоне;
- 2) для абсолютных измерений  $F$ , основной особенностью которого является то, что он при абсолютных наблюдениях устанавливается на то же место, на котором выполняются ДИ-измерения. При этом абсолютный магнитометр может использоваться как в непрерывном режиме записи, так и в ручном. Кроме того, при установке в подходящее место, он может выполнять непрерывные измерения и между абсолютными наблюдениями, т. е., по сути, дублировать скалярный магнитометр непрерывной записи.

На рис. 6 схематически показаны методы определения базисных значений. Схемы (1) и (2) используются при наличии двух скалярных магнитометров — для непрерывной записи и для абсолютных наблюдений. В этом случае при установке абсолютного скалярного магнитометра на основной столб определяется  $F_0$ , а при установке fDI-магнитометра — базисные  $H_0, D_0, Z_0$ . Схема (3) используется в том случае, если на обсерватории имеется только один скалярный магнитометр — он используется и как абсолютный, и как непрерывно пишущий прибор. Его базисное значение  $F_0$  (градиент между двумя его положениями) определяются по величине скачка записи при перестановках. Для определения базисных значений  $H_0, D_0, Z_0$  используется непрерывная запись этого скалярного магнитометра, установленного на втором столбе в абсолютном павильоне. В качестве реального примера на рис. 7 показаны абсолютные магнитометры fDI LEMI-203 и POS-1, используемые на обсерватории "Паратунка". При установке датчика POS-1 на основной столб вместо

LEMI-203, его измерения  $F_a$  используются для вычисления  $F_0$  скалярного магнитометра непрерывной записи GSM-90, расположенного в вариационном павильоне. Кроме этого, POS-1 используется и как скалярный магнитометр непрерывной записи (при расположении на постоянном месте, см. рис. 7в) в комплекте с dIdD GSM-19FD, а его  $F_0$  определяется по скачку  $F$  при перестановке на абсолютный столб и обратно.

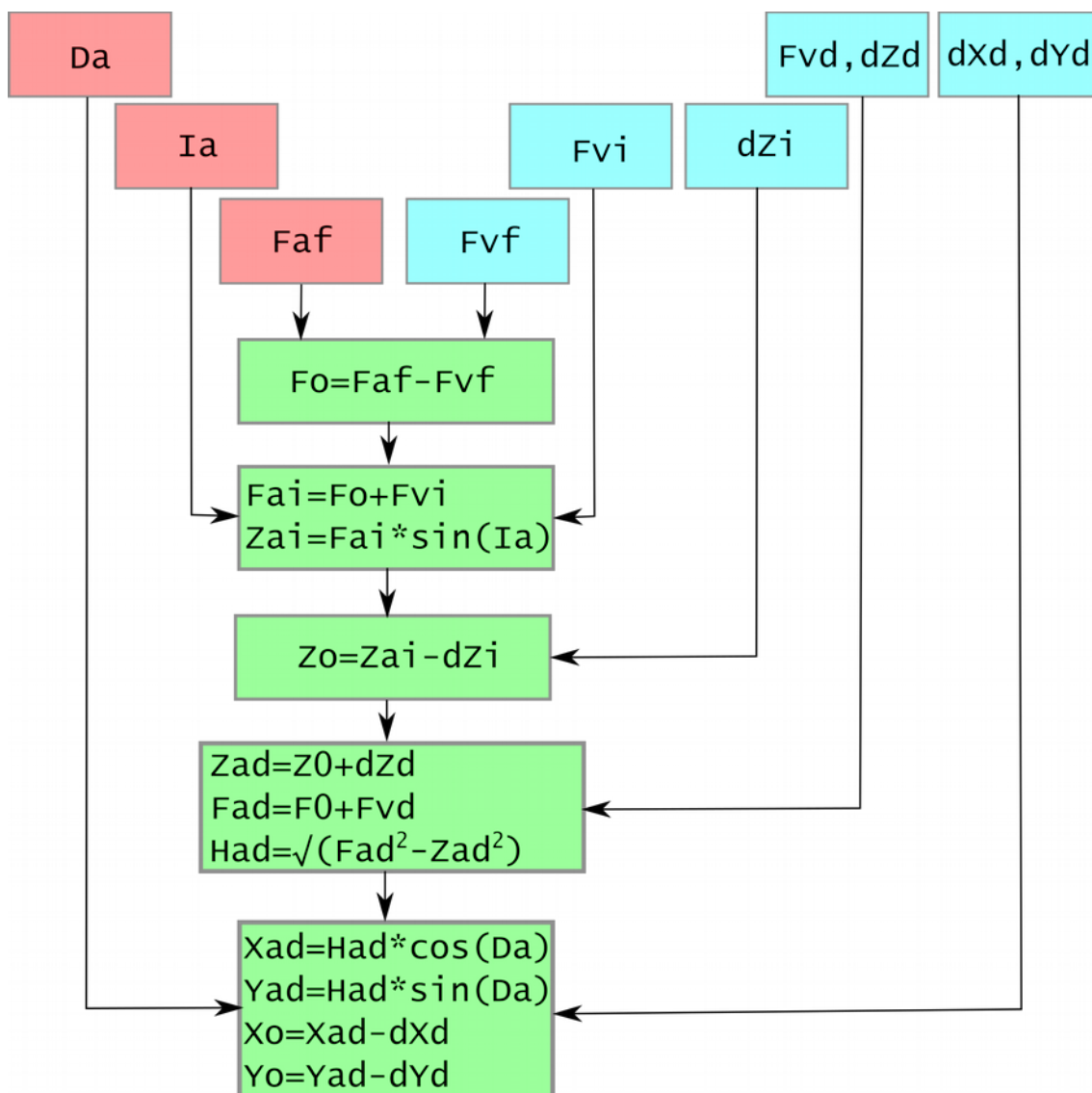


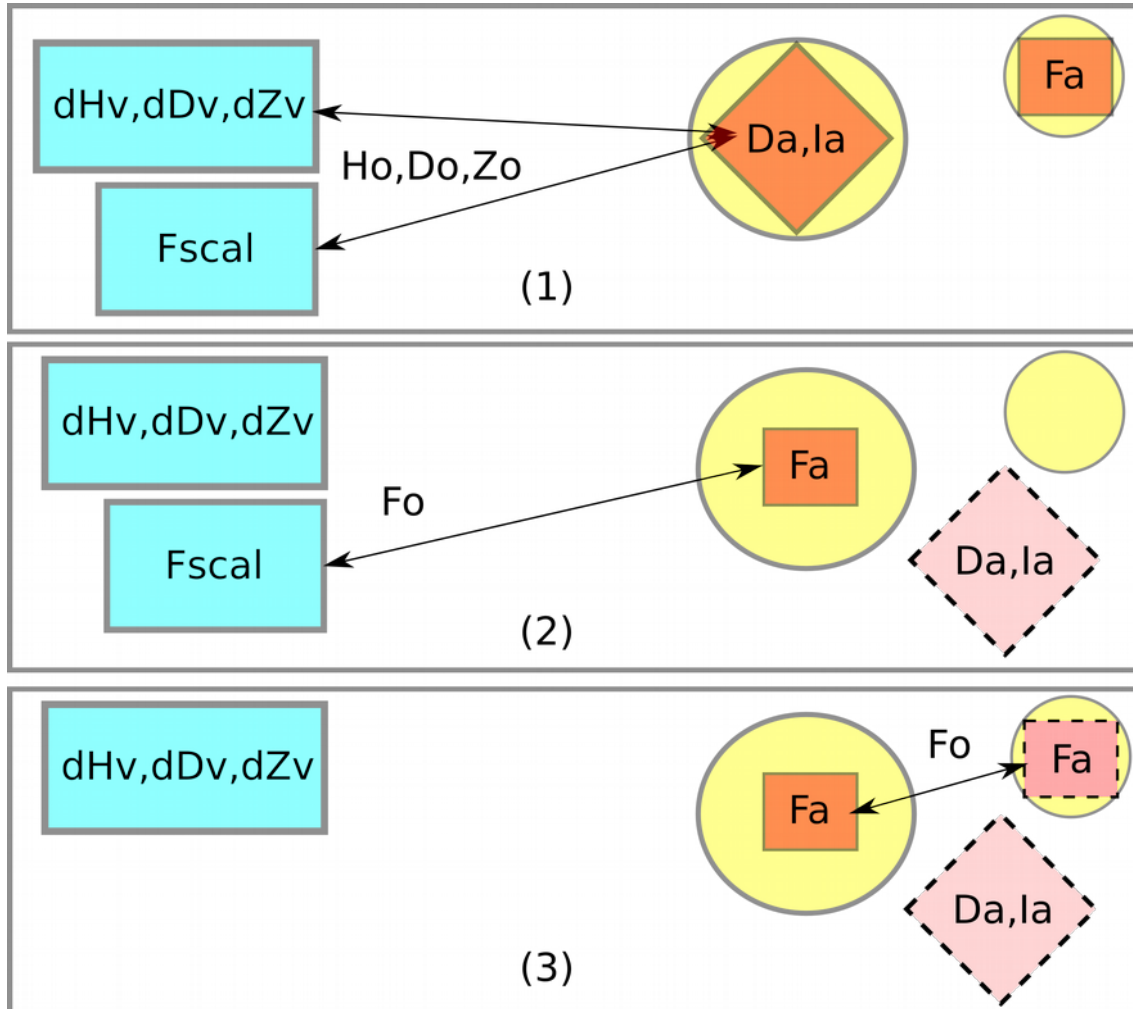
Рис. 5. Схема вычисления базисных значений  $X_0$ ,  $Y_0$  и  $Z_0$  для вариометра, ориентированного в XYZ-системе

Необходимо отметить, что на многих обсерваториях в относительно недалёком прошлом не использовался скалярный магнитометр непрерывной записи. Вместо него абсолютные измерения  $F$  выполнялись с помощью скалярных магнитометров с ручным пуском и визуализацией результатов измерений на встроенном дисплее прибора. Например, в таком режиме до 2009 г. работала обсерватория "Паратунка", где в качестве измерителя  $F_a$  использовался протонный магнитометр ММП-203. При таком методе абсолютных измерений существует проблема получения данных  $F_a$  на моменты измерения наклона (для вычисления  $H_a, Z_a$  при HDZ-ориентации вариометра) и на моменты измерения склонения и наклона (для вычисления  $X_a, Y_a, Z_a$  при XYZ-ориентации вариационного магнитометра). Одним из решений может быть оценка вариаций модуля  $dF$  по данным вариометра  $dH, dZ$  или  $dX, dY, dZ$  с помощью дифференциальных соотношений

$$dF = (H_0/F_0) \times dH + (Z_0/F_0) \times dZ$$

$$dF = (X_0/F_0) \times dX + (Y_0/F_0) \times dY + (Z_0/F_0) \times dZ$$

и вычисление  $F_a$ , используя базисное значение  $F_0$ , полученное при прямых абсолютных измерениях модуля.



**Рис. 6.** Схематическое представление основных измерительных схем на магнитной обсерватории. "dHv, dDv, dZv" и "Fscal" – вариационный компонентный и скалярный магнитометры в вариационном павильоне, "Da, Ia" и "Fa" – fDI- и абсолютный скалярный магнитометры в абсолютном павильоне. Кружками показаны основной (большого размера) и вспомогательный (меньшего размера) постаменты в абсолютном павильоне. Не используемые в конкретный момент времени магнитометры отмечены пунктиром. (1) — измерения  $H_0, D_0, Z_0$ , (2) — измерения  $F_0$ , (3) — измерения  $F_0$  при отсутствии скалярного магнитометра непрерывной записи.



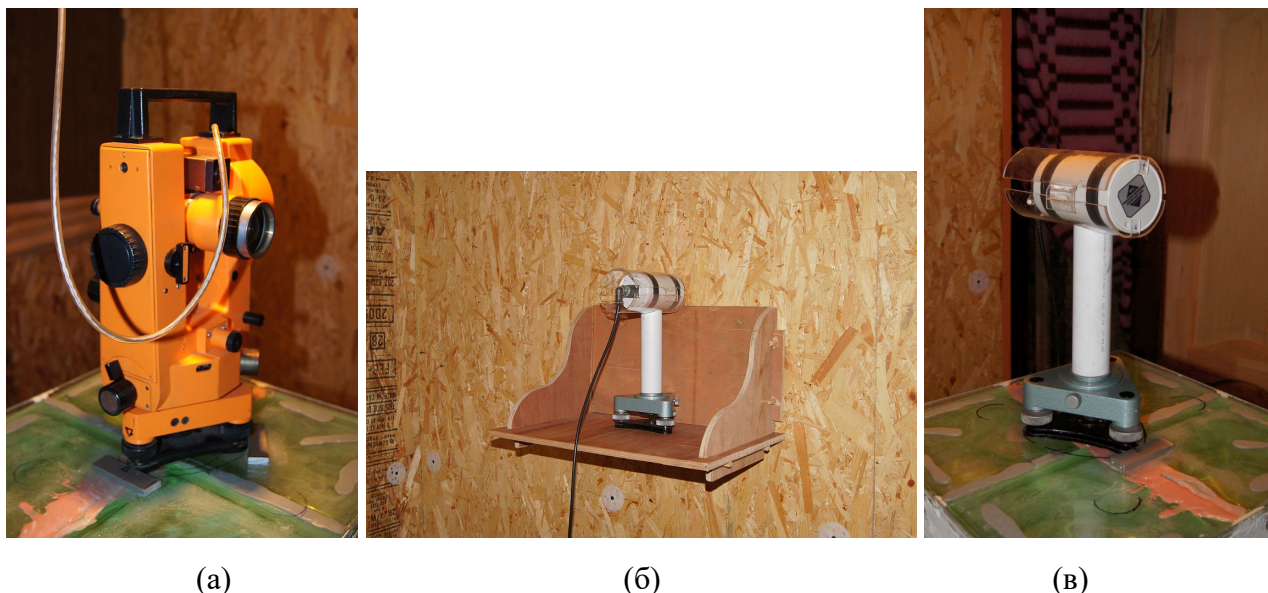


Рис. 7. Абсолютные магнитометры обсерватории "Паратунка". (а) — fDI-магнитометр LEMI-203 на основном постаменте в абсолютном павильоне, (б) и (в) — скалярный Оверхаузеровский магнитометр POS-1 (датчик) на постоянном месте и на основном постаменте в абсолютном павильоне.

## 2.1. Этапы обработки результатов абсолютных наблюдений и вычисления базисных значений

В целом можно выделить три основных этапа обработки абсолютных наблюдений:

- 1) ввод в компьютер результатов измерений, зафиксированных в рукописных журналах наблюдений (или на бланках), и вычисление абсолютных значений поля;
- 2) вычисление базисных значений;
- 3) визуализация и оценка результатов, получение текущих базисных значений.

Естественно, деление на такие этапы носит достаточно условный характер и зависит от используемой аппаратуры, методов наблюдений, программного обеспечения, исторических факторов и т. п. Например, при офсетном методе вычисление абсолютных значений  $D_a$ ,  $I_a$  выполняется на этапе 2, т. е. только при наличии данных вариационного магнитометра. В нуль-методе абсолютные значения склонения и наклонения могут быть получены и без вариационных данных — это даёт важное преимущество при полевых измерениях, т. к. абсолютные значения представляют ценность и сами по себе, являясь характеристикой полного вектора магнитной индукции, привязанной к моменту измерений.

Разделение на этапы позволяет также реализовать "модульный" принцип, важный для используемого ПО — на каждом этапе используются независимые программные модули, обмен информацией между которыми осуществляется либо через внешние файлы, либо через массивы данных в памяти, если обработка ведётся в специализированной программной среде, например, MATLAB. При этом некоторые модули не зависят от конкретных специфических условий, т. е. становятся универсальными и применимыми для обработки данных различных приборов. Существенным при поэтапной обработке становится

разделение по времени. Например, визуализацию базисных значений можно выполнять в любое время, независимо от обработки результатов текущих наблюдений.

### 2.1.1. Первичная обработка результатов абсолютных наблюдений

Основная задача этого этапа обработки — ввести результаты абсолютных наблюдений в компьютер, выполнить первичную обработку и обнаружить ошибки набора данных (и, возможно, ошибки наблюдений).

Первичный носитель результатов абсолютных наблюдений — это журналы или бланки наблюдений, куда наблюдатель по ходу измерений записывает требуемую информацию. Бланки хороши тем, что в табличном виде уже содержат поля, которые необходимо заполнить перед абсолютными наблюдениями, в процессе и после. Некоторый недостаток бланков связан с тем, что они сделаны на отдельных листах, часто формата А4, т. е. большого размера, что не всегда удобно при ограниченном месте в абсолютном павильоне, где ведутся записи. Кроме того, обычно бланки сшиваются в папки, т. е. имеются затруднения с тем, чтобы приносить бланки наблюдений предыдущих суток с собой в павильон, что бывает важно для сравнения текущих измерений с предыдущими. Отдельные листы бланков также легче потерять. Журналы наблюдений лишены описанных выше проблем, однако они требуют некоторых дополнительных усилий от наблюдателя по заполнению: расчерчивание, заполнение названия полей и т. п. Кроме того, если журналы ведутся в обычных толстых тетрадях, приходится решать проблему со стальными скобками. Также при утере журнала происходит потеря первичной информации за много дней наблюдений. Но выбор автора — журналы наблюдений, именно они используются на обсерваториях ИКИР ДВО РАН. Примеры протоколирования абсолютных наблюдений на бланке и в журнале представлены на рис.8 и 9.

Важнейший момент этого этапа и достаточно дискуссионный — выбор формата файлов для хранения первичных данных с результатами абсолютных наблюдений. Один из достаточно распространённых форматов — табличный, прежде всего, в виде таблиц стандартных программных пакетов. На рис. 10 представлен фрагмент файла MS Excel, который представляет собой специальную форму для ввода исходных данных и вычисления базисных значений вариометра в системе HDZ. Форма разработана магнитологами обсерватории "Нимег" (ИФЗ, Потсдам, Германия) и была рекомендована для обсерваторий, на которых были установлены магнитометры, подготовленные немецкими магнитологами. В качестве примера выбрана страница "Вычисление D", на которой наблюдатель может заполнить соответствующие поля величинами из журнала наблюдений (моментами времени, отсчётами со шкал горизонтального и вертикального кругов теодолита и т. п.). Аналогичные действия выполняются для наклона. После заполнения и связывания таблицы с текущими файлами измерений вариационного и скалярного магнитометров, имеется возможность получить базисные значения. Несомненные достоинства такой табличной формы — универсальность (если используются стандартные программные пакеты) и наглядность. Однако при необходимости обработать много наблюдений возникают сложности, поскольку навигация по полям таблицы требует значительного времени. Реальное применение этих таблиц на обсерватории "Паратунка" показало также проблемы национальной локализации MS Office, например, при использовании десятичного разделителя (десятичной точки в стандартной версии пакета и десятичной запятой в русифицированной версии). Подобные табличные формы, например, используются на обсерватории "Патроны" (ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск), на основе математического пакета QPRO.

**Petropavlovsk-Kamchatskiy Observatory**  
**Measurement Protocol DI-flux**

DIF: Lemni-203, Prot. Magn.: MMP-203M2 *ЗТ2КП 115V (Новосибирск)*

Location: *PET* Date: *12.09.2012* Observer: *Babakhanov*

Measurement point: *1* Comments: *write - computer*

Azimuth marks	Mark 1:		Mark 2:		Mark 3:	
	Sensor down	Sensor up	Sensor up	Sensor down	Sensor up	Sensor down
before	03 28	05 27	03 01			
measurement						

Sensor	UTC			Horizontal circle			Vertical circle	Comments	
	h	m	s						
B+	03	26	30	284	44	50	270°	?	
E <sub>u</sub>									
3+	03	29	25	104	52	46	90°		
W <sub>u</sub>									
D	03	32	10	105	31	54	90°		
E <sub>o</sub>									
B-	03	34	05	285	31	38	90°		
W <sub>o</sub>									
	Magn. meridian Σ								

Azimuth marks	Mark 1:		Mark 2:		Mark 3:	
	Sensor down	Sensor up	Sensor up	Sensor down	Sensor up	Sensor down
after	03 33	05 02	02 54			
measurement						

Sensor	UTC			Horizontal circle			Vertical circle	Comments
	h	m	s					
N <sub>u</sub>	03	38	30	195	10	17	65 17 32	
S <sub>o</sub>	03	40	00				245 15 43	
N <sub>o</sub>	03	43	15				204 44 58	
S <sub>u</sub>	03	46	00	15	10	17	114 46 37	

F	UTC			F	UTC			F	Comments
	h	m	s		h	m	s		
Ground value:									
nT									

Рис. 8. Пример заполненного бланка абсолютных наблюдений на обсерватории "Паратунка". Использовался fDI-магнитометр ЗТ2КП обсерватории "Ключи" (Новосибирск), наблюдения и запись выполнялись разными людьми (И.Бабаханов и С.Хомутов). Форма бланка была разработана магнитологами обсерватории "Нимег" (NGK).

Некоторая модификация табличного метода — это использование форм, разработанных вне стандартных таблиц. Примером может быть программный пакет MagPY, разработанный на обсерватории Conrad, Австрия (<https://github.com/geomagpy/magpy>) на основе пакета Python. Табличная форма используется для ввода результатов абсолютных наблюдений и сохранения в файлах (обычно, в текстовом формате). Хранение набранных данных в простом ASCII-формате решает проблему доступности этой информации практически в любой компьютерной системе. Такой подход также удобен для дистанционной обработки, когда наблюдатель на компьютере обсерватории подключается через Интернет к удалённому серверу, на котором заполняет форму и выполняет все вычисления. Набранная информация хранится на сервере во внутренних форматах, а протокол обработки и её результаты выводятся на локальный ПК на обсерватории. Примером такого подхода является обработка, выполняемая на сервере ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru/dataserv-absforms-pass.php>).

Нами для хранения первичных результатов абсолютных наблюдений выбран максимально простой формат. Данные набираются в обычном текстовом файле (ASCII), т. е. практически любым текстовым редактором в любой операционной системе. Использование метаданных (описание приборов, наблюдателя и т. п.) сведено к минимуму — вводится только код инструмента и код наблюдателя. Также минимизирован набор нечисловых символов, подобных двоеточию ":" для разделения полей времени и углов ЧАС:МИН:СЕК или DD:MM:SS. Всё это позволяет очень быстро набрать результаты десяти и более абсолютных измерений, в один файл. Пример содержимого такого файла, набранного по информации в

журнале наблюдения (рис. 9), представлен в табл. 2 (в правом столбце таблицы даны объяснения).

The image shows a handwritten journal page with four columns of data. The columns are headed with the date '24.11.2017' and the location 'Холмунга' (Kholmunga). The data includes various measurements such as '16.0', '16.5', '16.0', '25.0', '26.30', '27.35', '28.30' and corresponding coordinates and times. Circled numbers 1 through 7 highlight specific parts of the journal: 1 (date and observer), 2 (instrument and sensor details), 3 (time), 4 (teodolite readings), 5 (conditions), 6 (magnetic meridian corrections), and 7 (POS-1 sensor setup).

Рис. 9. Пример журнала абсолютных наблюдений на обсерватории "Паратунка" (показаны 3 серии наблюдений на fDI-магнитометре и 1 серия на Mag-01H). Цифрами отмечены поля, заполняемые наблюдателем: 1 — дата, наблюдатель, название fDI-магнитометра (номер при необходимости), 2 — положение трубы и датчика ("+" - датчик сверху, "-" - датчик снизу, "M" — наведение на Миру, "З", "В" — труба направлена на запад или восток, "С", "Ю" — труба в магнитном меридиане, направлена на север или юг, 3 — моменты времени (часы, минуты, секунды), при нулевых показаниях феррозондового датчика при соответствующих положениях датчика и трубы, 4 — отсчёты по горизонтальной и вертикальной шкалам теодолита (в градусах, минутах и секундах), также между наблюдениями склонения и наклонения показан отсчёт по ГК положения магнитного меридиана, 5 - описание условий при наблюдениях, 6 — отсчёты по ГК при наведении трубы на дополнительную Миру, 7 — установка датчика скалярного абсолютного магнитометра POS-1 на основном постаменте (вместо fDI-магнитометра).



Sen <sup>o</sup>	A	UTC	Reading			Var	Var	Red_Var <sup>o</sup>	Red_Read <sup>o</sup>	
Nr	[ ]	(1)	°	'	"	D <sup>o</sup>	D/nT	D <sup>o</sup>	(5)-(5)[1]	(2)-(6)
						(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	2:42:02	127 34 36	127	34	36	127,57667	-457,9	-1,2118	0,00000	127,57667
2	2:42:02	127 34 36	127	34	36	127,57667	-457,9	-1,2118	0,00000	127,57667
3	2:42:02	127 34 36	127	34	36	127,57667	-457,9	-1,2118	0,00000	127,57667
4	2:43:30	309 14 57	129	14	57	129,24917	-458,1	-1,2124	-0,00053	129,24970
5	2:43:30	309 14 57	129	14	57	129,24917	-458,1	-1,2124	-0,00053	129,24970
6	2:43:30	309 14 57	129	14	57	129,24917	-458,1	-1,2124	-0,00053	129,24970
7	2:45:18	309 18 38	127	18	38	127,31056	-458,6	-1,2137	-0,00185	127,31241
8	2:45:18	309 18 38	129	18	38	129,31056	-458,6	-1,2137	-0,00185	129,31241
9	2:45:18	309 18 38	129	18	38	129,31056	-458,6	-1,2137	-0,00185	129,31241
10	2:47:25	127 39 56	127	39	56	127,66556	-458,5	-1,2134	-0,00159	127,66714
11	2:47:25	127 39 56	127	39	56	127,66556	-458,5	-1,2134	-0,00159	127,66714
12	2:47:25	127 39 56	127	39	56	127,66556	-458,5	-1,2134	-0,00159	127,66714
Mean:			A <sub>z</sub> = 128,28382			sin D <sub>z</sub> = -0,10663		A <sub>z</sub> = 128,28481		
						cos D <sub>z</sub> = 0,99430				
			D = A <sub>z</sub> + A <sub>z</sub> - A <sub>z</sub> - 90° = -6,11991 °						δ <sub>z</sub> ' = -7,70	
			D <sub>z</sub> = A <sub>z</sub> + A <sub>z</sub> - A <sub>z</sub> - 90° = -6,12090 °						g <sub>z</sub> ' = -18,35	
			(4) Var. D <sub>z</sub> = (3) / (0.01745 * F <sub>z</sub> * cos I <sub>z</sub> )						S <sub>z</sub> /nT = -65,6	

Рис. 10. Пример файла таблицы Excel (лист "Вычисление D") для ввода и хранения результатов абсолютных наблюдений, разработанного на обсерватории "Нимег" (NGK, Потсдам).

До некоторой степени этот формат имеет исторические корни и был вызван необходимостью быстро выполнить обработку результатов наблюдений в полевых условиях, когда за день могло быть сделано до 20-30 измерений и требовалась оценка результатов для планирования работ на следующие сутки. При наборе предполагается выдерживание формата, т. е. строки выравнивались по правому краю за счёт использования лидирующих нулей, когда вместо "62 3 15" записывается "062 03 15" — этим повышается эффективность при поиске ошибок набора. Как уже отмечалось, метаданные в файле практически отсутствуют. Естественно, это снижает качество их "автономности" и требует дополнительных файлов с описанием особенностей измерений (кроме рукописных журналов), например, пункта наблюдений, температуры, особенностей освещения, азимута Миры и т. п. Достоинством такого формата можно также считать то, что все результаты всех абсолютных измерений за сутки собраны в

единственном файле, что при ежедневных наблюдениях по 3-6 серий упрощает ведение архива (годовое число файлов не превышает кол-во суток в году). Имена суточных файлов имеют стандартный вид — DIF\_YYYYMMDD.dat, где YYYY, MM, DD — год, месяц и число.

**Таблица 2. Пример файла с результатами абсолютных наблюдений 24.11.2017 г. на обсерватории "Паратунка"**

Содержимое файла	Описание
n28 hom 106 24 25 286 24 24 106 24 14 286 24 23 02 55 00 02 55 55 02 57 20 02 58 20 340 10 25 160 18 44 160 20 42 340 09 34 03 01 35 03 02 35 03 04 00 03 04 50 294 35 03 114 35 51 065 29 28 245 28 55	код инструмента, код наблюдателя 4 отсчёта на Миру – DD MM SS 4 отсчёта UT для D – HH MM SS 4 отсчёта ГК для D – DD MM SS 4 отсчёта UT для I – HH MM SS 4 отсчёта ГК для I – DD MM SS
n28 hom 286 24 27 106 24 17 286 24 24 106 24 20 03 08 00 03 08 55 03 09 50 03 10 40 160 20 29 340 09 19 340 10 05 160 18 19 03 14 50 03 15 40 03 16 45 03 17 45 065 29 23 245 28 52 294 35 05 114 35 53	
n28 hom 106 24 17 286 24 29 106 24 21 286 24 26 03 20 05 03 21 00 03 21 55 03 22 50 340 10 29 160 18 27 160 20 34 340 09 30 03 25 40 03 26 30 03 27 35 03 28 30 294 35 04 114 35 50 065 29 23 245 28 47 03 29 45 03 29 50 03 29 55 03 30 00 03 30 05 52038.306 52038.336 52038.358 52038.379 52038.393 03 30 10 03 30 15 03 30 20 03 30 25 03 30 30 52038.408 52038.397 52038.392 52038.359 52038.379	5 отсчётов UT для F – HH MM SS 5 отсчётов F – FFFFF.FFF 5 отсчётов UT для F – HH MM SS 5 отсчётов F – FFFFF.FFF
n43 hom 295 22 11 115 49 10 295 22 12 115 49 14 03 39 55 03 41 00 03 41 45 03 42 30 169 46 42 349 07 51 349 08 27 169 44 15 03 46 45 03 47 35 03 48 40 03 49 30 294 24 54 114 25 24 065 18 20 245 18 18	
n43 hom 115 49 07 295 22 11 115 49 12 295 22 10 03 52 00 03 53 05 03 53 50 03 55 05 349 08 32 169 44 03 169 46 03 349 08 14 03 58 15 03 59 10 04 00 10 04 01 00 065 18 22 245 18 30 294 24 53 114 25 26	
n43 hom 295 22 10 115 49 14 295 22 04 115 49 20 04 03 10 04 04 15 04 05 05 04 06 00 169 45 46 349 08 00 349 08 33 169 44 16 04 09 00 04 09 50 04 10 50 04 11 40 294 24 59 114 25 14 065 18 24 245 18 32 04 15 25 04 15 30 04 15 35 04 15 40 04 15 45 52037.914 52037.913 52037.930 52037.933 52037.976 04 15 50 04 15 55 04 15 60 04 16 05 04 16 10 52037.986 52037.988 52037.969 52037.959 52037.920	

Один из важных моментов при абсолютных наблюдениях — это синхронизация отсчётов UT при нулевом положении феррозондового датчика fDI-магнитометра (ось датчика перпендикулярна вектору магнитной индукции) с периодичностью вариационных измерений. Например, если измерения F скалярным магнитометром выполняются через 5 с, допустим в 00, 05, 10 с..., то рекомендуется брать отсчёты для fDI-прибора в эти же моменты времени. В противном случае при обработке придётся выполнять интерполяцию реальных данных F на моменты DI-измерений, т. е. возникает источник дополнительных погрешностей.

Также необходимо отметить, что в файле хранятся и результаты абсолютных измерений

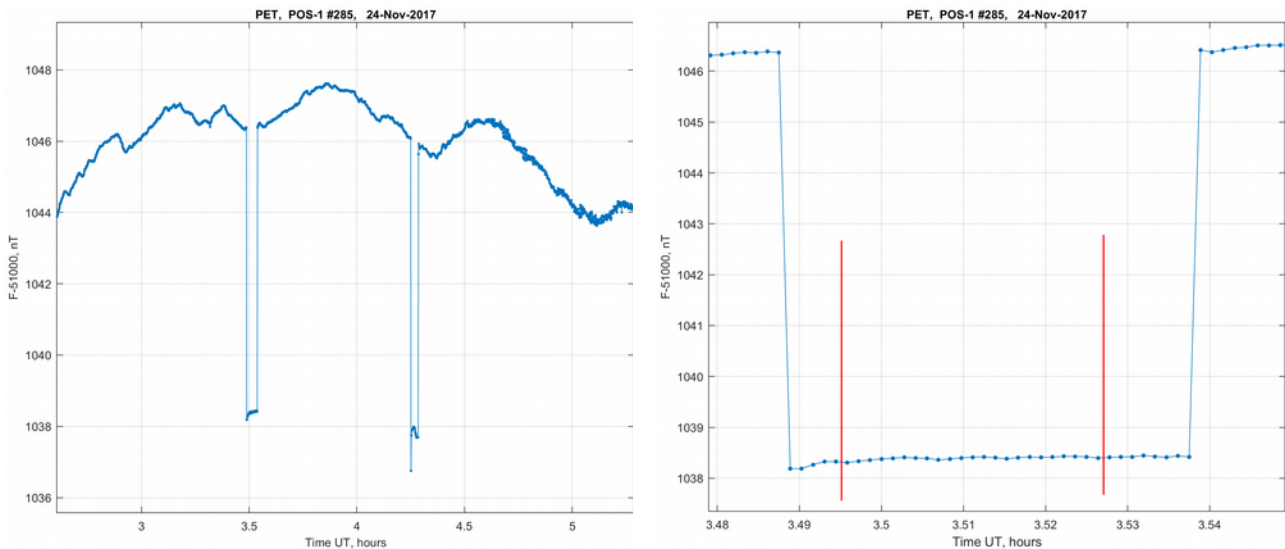
модуля F с помощью скалярного магнитометра, т.е., по сути, файл содержит всю информацию, необходимую для оценки полного вектора магнитной индукции, без привлечения других данных. Данные об F представляют собой 10 измерений, разбитых по 5 записей в строке (UT и F). Эти данные вводятся в файл после той DI-серии, когда fDI-магнитометр был снят с поста и на его место установлен датчик скалярного магнитометра. Количество таких процедур не ограничено. В приведенном примере DI-наблюдения выполнялись на двух fDI-магнитометрах (LEMI-203 и Mag-01H), и F было измерено после каждого из этих приборов. Если абсолютные измерения F не делались, запись в файле просто отсутствует. Если измерения F делались скалярным магнитометром в другом месте, то привязка к серии DI-наблюдений не требуется, но необходимо выдерживать хронологию измерений: моменты измерений F не могут предшествовать моментам измерений склонения и наклонения. Продолжительность нахождения датчика скалярного магнитометра на основном столбе на обсерватории "Паратунка" принята около 1.5 мин. Конечно, 10 измерений F может показаться недостаточно значимым количеством, однако необходимо учитывать, что базисные значения F0 вполне стабильны и в общем случае такая продолжительность измерений F на основном столбе в абсолютном павильоне будет приемлемой.

Внести значения F в файл результатов абсолютных наблюдений можно непосредственно из файла скалярного магнитометра, если он имеет текстовый вид, как, например, в данном случае, для магнитометра POS-1:

F, пТл	QMC	C	Дата	UT	Долгота	Широта	GPS
52038326	00010	88	11.24.17	03:29:40,00	1581504047	0525835421	NE
52038306	00010	88	11.24.17	03:29:45,00	1581504047	0525835421	NE
52038336	00010	88	11.24.17	03:29:50,00	1581504047	0525835421	NE
52038358	00009	88	11.24.17	03:29:55,00	1581504047	0525835421	NE
52038379	00010	88	11.24.17	03:30:00,00	1581504047	0525835421	NE
52038393	00009	88	11.24.17	03:30:05,00	1581503965	0525835421	NE
52038408	00011	88	11.24.17	03:30:10,00	1581503965	0525835421	NE
52038397	00009	88	11.24.17	03:30:15,00	1581503965	0525835421	NE
52038392	00011	88	11.24.17	03:30:20,00	1581503965	0525835401	NE
52038359	00009	88	11.24.17	03:30:25,00	1581503965	0525835421	NE
52038379	00010	88	11.24.17	03:30:30,00	1581504047	0525835380	NE
52038400	00010	88	11.24.17	03:30:35,00	1581504047	0525835380	NE

Здесь F и параметр качества измерения QMC приводятся в пТл, также записываются координаты, поскольку для синхронизации таймера используется встроенный GPS-приёмник, "C" — флаг измерения, показывающий в шестнадцатеричном формате оценку условий при измерении.

Понятно, что такое ручное снятие данных непосредственно из первичного файла трудоёмкое, с высокими шансами ошибок. Для автоматизации был разработан скрипт — **pos1\_to\_dif** и **select\_pos1**. После запуска **pos1\_to\_dif** магнитолог вводит дату наблюдений и получает график F (см. рис. 11, левая панель). На кривых видны два скачка уровня F, которые возникают при перестановке датчика POS-1 с места постоянных измерений на основной столб в абсолютном павильоне (величина градиента между этими двумя точками составляет около 8 нТл). Далее с помощью функции Zoom выделяется фрагмент записи при измерении на абсолютном столбе и после запуска скрипта **select\_pos1** отмечается начало и конец приемлемой записи (см. рис. 11, правая панель). От левой границы скриптом отсчитывается 10 измерений, которые выводятся в командное окно MATLAB и через буфер обмена вставляются в файл с результатами абсолютных наблюдений. Отметка правой границы требуется, чтобы формально закрыть процедуру выделения и вывода. На рис. 12 в качестве примера показано стандартное графическое окно MATLAB, в котором выполняются описанные выше операции.



**Рис. 11.** Обработка данных скалярного магнитометра POS-1 при выводе в файл результатов измерений на основном постаменте. Левая панель — фрагмент записи, на котором видны скачки  $F$  при перестановке датчика POS-1 с постоянного места на столб для абсолютных наблюдений. Правая панель — увеличенный фрагмент (первая перестановка), на котором отмечается интервал данных, которые должны быть взяты в обработку.

Теперь файл с первичными данными абсолютных наблюдений подготовлен и можно выполнить предварительную обработку этих данных. Используется скрипт `dif_hms_pet.m`. Основная задача данной процедуры — получить абсолютные значения  $D$ ,  $I$  и  $F$  и подготовить информацию для следующей процедуры — вычисления базисных значений. Одновременно оцениваются следующие моменты:

- наличие файла с результатами абсолютных наблюдений, т. е., фактически, корректность имени файла и его расположения;
- корректность кодовых имён fDI-магнитометра и наблюдателя. Набор используемых имён прописан в скрипте и для упрощения дальнейшей обработки каждому имени присваивается соответствующий цифровой номер, например, основной fDI-магнитометр LEMI-203 имеет код "n28" и номер 1, наблюдатель Хомутов имеет код "hom" и номер 8. При смене наблюдателей (например, сотрудник уволился и был принят новый) присваивается новый код, но сохраняется старый цифровой номер. При несовпадении набранных кодов тем, которые прописаны в скрипте, инструменту присваивается цифровой номер "99", наблюдателю — номер "9" и выводится сообщение о неизвестном инструменте или наблюдателе.

Подобная ситуация возможна не только при ошибках набора — например, при наблюдениях магнитологом из другой обсерватории или использовании привезенного fDI-прибора. Кроме того, номер "9" присваивается новому наблюдателю в период его обучения. Цифровые значения кодов необходимы в дальнейшем при работе с базисными значениями — обычно результаты, полученные на абсолютном fDI "99" и наблюдателем "9", не используются для оценки принятых или текущих базисных значений. При этом они отображаются графически.



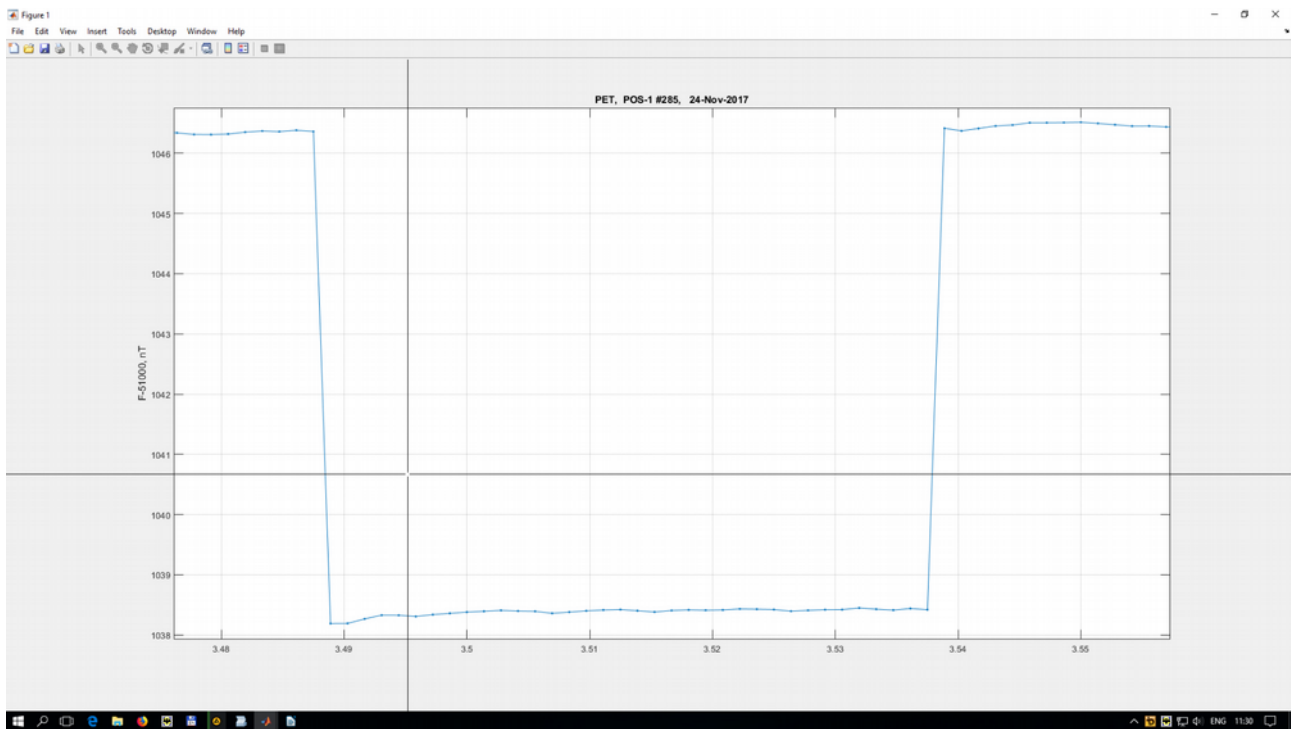


Рис. 12. Пример стандартного окна Figure пакета MATLAB с элементами управления. Вертикальная и горизонтальная линии формируются с помощью встроенной функции `ginput()` и снимают координаты (в текущих осях) точки их пересечения.

В процессе работы скрипта `dif_hms_pet.m` формируются массивы:

- средних значений  $M(ks)$  отсчётов по горизонтальному кругу (ГК) при наведении на Миру ( $M$  есть просто арифметическое среднее приведённых к одному квадранту отчётов каждой серии  $ks$  — например,  $M+$ ,  $M-$ ,  $M+$ ,  $M-$ );
- ошибок замыкания  $dM(ks)$  отсчётов на Миру. Здесь необходимо дать более развёрнутое замечание, т. к. этот параметр достаточно важный. Ошибка замыкания — это разность средних значений отчётов на Миру  $M+(ks)$  и  $M-(ks)$  перед наблюдением склонения и после  $M+(ks)$  и  $M-(ks)$ . Эта разность должна быть близка к 0. Отличие от 0 может указывать на то что теодолит был сдвинут во время наблюдения склонения, т. е. к результатам необходимо будет относиться с особым вниманием. На некоторых обсерваториях при наблюдении склонения снимают отсчёты на Миру только при одном положении датчика, например, в начале  $M+$ , после наблюдения  $M-$ . Это не совсем корректно, т. к. разность  $M+$  и  $M-$  будет характеризовать не только возможный разворот теодолита за время наблюдения склонения, но и коллимационную ошибку теодолита (неортогональность зрительной трубы и горизонтальной оси), которая достаточно часто отличается от нуля на заметную величину. Конечно, среднее значение и по четырём, и по двум отсчётам на Миру даст искомое значение, однако интерпретация ошибки замыкания будет совершенно различная;
- моментов времени  $UT(D)$  и отсчётов ГК по шкале горизонтального круга при нулевом положении датчика (4 различных взаимных положения датчика и направления зрительной трубы —  $3+$ ,  $B+$ ,  $3-$ ,  $B-$ ) при наблюдении склонения;
- моментов времени  $UT(I)$  и отсчётов ВК по шкале вертикального круга при нулевом положении датчика (4 различных взаимных положения датчика и направления зрительной трубы —  $C-$ ,  $Ю+$ ,  $C+$ ,  $Ю-$ ) при наблюдении наклонения;

- моментов времени UT(F) и значений модуля поля F при установке датчика скалярного магнитометра на основной постамент в абсолютном павильоне.

Также для каждой серии вычисляются отсчёты по шкале ГК, соответствующие направлению на средний магнитный меридиан, полученный при наблюдении склонения. Эти значения сравниваются с теми, которые наблюдатель вычисляет по отсчётам  $Z^+$ ,  $V^+$ ,  $Z^-$ ,  $V^-$  непосредственно во время измерений — как дополнительный контроль ошибок набора данных в файл и вычислительных ошибок при наблюдениях (эти ошибки являются ошибками в оценке положения магнитного меридиана и при значительной величине могут исказить результаты по определению наклона). Необходимые для дальнейших вычислений величины выводятся во временный файл, т.е. в дальнейшем они могут использоваться неоднократно следующей процедурой, если потребуется, без повторных вычислений. Более того, результаты этих вычислений не зависят от вариационных магнитометров, для которых необходимо получить базисные значения, т.е. этот этап обработки применим, например, в полевых наблюдениях, где требуется оценить именно абсолютные значения поля.

Скриптом для каждой серии наблюдений вычисляются абсолютные значения склонения D и наклона I и выводятся в командное окно MATLAB и на график, для визуального контроля. Пример вывода (по одной серии для каждого используемого в эти сутки fDI, представлен ниже:

```
>> dif_hms_pet
Введите дату в виде DD.MM.YYYY ..... 24.11.2017
-----
Серия ... 1 n28 hom
Среднее время UT (D,I) ..... 02:57 03:03
Ошибка замыкания серии по Мире ... 0:00:06
Отсчет по ГК для Мире ..... 106:24:21
Отсчет по ГК для D ..... 250:14:51
Отсчет для D ..... 216:09:30
Склонение D ..... -6:20:34
Наклонение I ..... 65:26:52
...
Серия ... 4 n43 hom
Среднее время UT (D,I) ..... 03:41 03:48
Ошибка замыкания серии по Мире ... 0:00:-3
Отсчет по ГК для Мире ..... 115:35:42
Отсчет по ГК для D ..... 259:26:49
Отсчет для D ..... 216:08:53
Склонение D ..... -6:19:57
Наклонение I ..... 65:26:35
...
Модуль F ... 52038.3 52038.3 52038.4 52038.4 52038.4
... 52038.4 52038.4 52038.4 52038.4 52038.4
Модуль F ... 52037.9 52037.9 52037.9 52037.9 52038.0
... 52038.0 52038.0 52038.0 52038.0 52037.9
```

На рис. 13 показаны абсолютные значения D и I, полученные для примера 24.11.2017 г. Необходимо отметить, что для вычисления D необходимо знать азимут Мире. Азимут может быть определён различными способами: геодезическим (с передачей эталонного азимута с помощью геодезических построений), астрономическим (по наблюдениям Солнца или Полярной) и, в современных условиях, с помощью GPS-измерений.

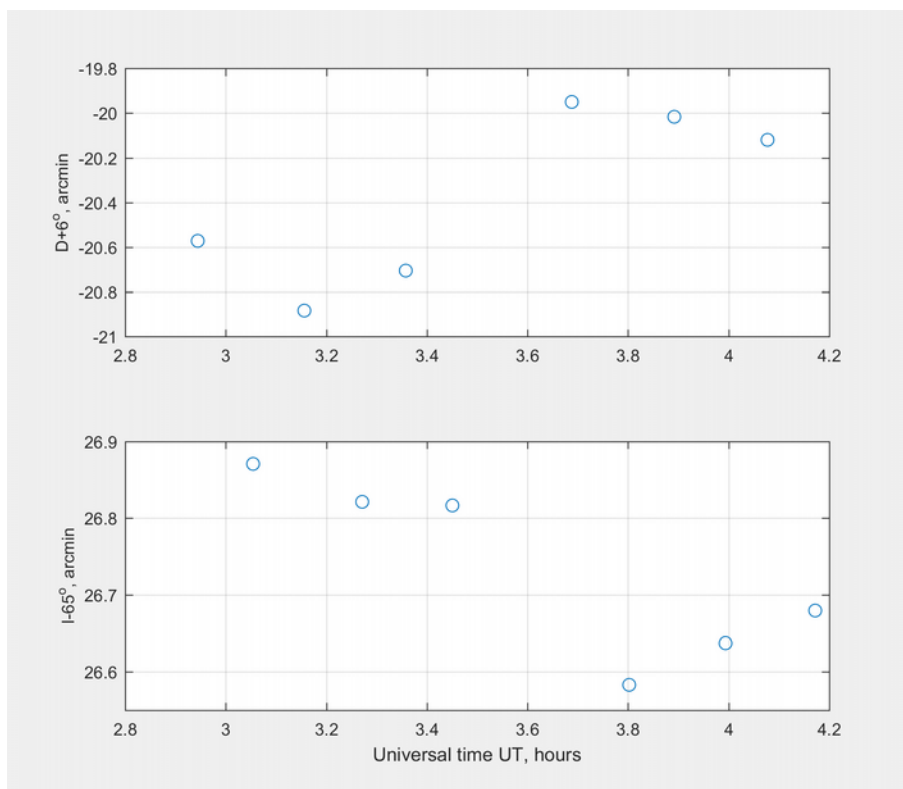


Рис. 13. Абсолютные значения магнитного склонения  $D$  и наклонения  $I$ , вычисленные по результатам наблюдений 24.11.2017 г.

## 2.1.2. Вычисление базисных значений

Как уже отмечалось, вычисления базисных значений зависят от используемого типа вариационного магнитометра, его ориентации, от конфигурации системы измерения модуля и т. п.

### 1.2.1.1. Базисные значения FDI-вариометра

Рассмотрим сначала простой вариант вариометра с FDI-ориентацией (см. рис. 3). На обсерватории "Паратунка" он представлен магнитометром dIdD GSM-19FD. В схеме FDI скалярный прибор для непрерывной записи является одним из элементов dIdD.

Рабочий каталог:	<b>d:\Paratunka\dIdD\DI</b>
Файл инициализации:	<b>d:\Paratunka\ini_parameters\didd_ini.m</b>
Папка с файлами первичных данных:	<b>d:\Paratunka\Data\dIdD\2017</b>
Скрипт для вычислений:	<b>base_calc_didd.m</b>

После запуска скрипта и ввода даты выполняется следующее:

- 1) считывается файл с инициализационными параметрами;
- 2) считываются первичные данные dIdD. Имена файлов данных определены разработчиком и имеют вид **20171124.mag** или в общем виде **YYYYDDMM.mag**, где YYYY,MM,DD – год, месяц и число. Используется функция **didd\_var\_read\_fun()**:

`[th,Fv,dIv,dDv,head]=didd_var_read_fun(file_dIdD);`

При регистрации данных dIdD в файл записываются пять значений модулей поля (полный цикл измерений), в т.ч. два модуля с дополнительными полями в колечной системе склонения D (в восточном и западном направлениях Dp, Dm), два модуля с дополнительными полями в колечной системе наклонения I (Ip и Im) и модуль F без дополнительных полей. Также выводятся вариации dD и dI, вычисленные по F, Dp, Dm и F, Ip, Im, соответственно, и время начала цикла. Функция **didd\_var\_read\_fun()** считывает именно значения F, dD и dI. При этом особенностью программы регистрации dIdD, поставляемой в комплекте магнитометра, является то, что значения dD и dI в файле данных вычисляются не по исходным модулям (F, Dp, Dm, Ip, Im), а по сглаженным значениям (используется фильтр Гаусса, рекомендованный INTERMAGNET). Таким образом, имеется несогласованность между мгновенными абсолютными значениями D и I и сглаженными вариациями dD и dI. При возмущённом поле это может приводить к дополнительным ошибкам в базисных значениях D0 и I0;

3) определяется базисное значение модуля F0 (или, что до некоторой степени эквивалентно) пространственный градиент dFgrad между точкой установки dIdD и основным столбом в абсолютном павильоне). Здесь рассматриваются два варианта:

- имеются абсолютные измерения Fa на основном столбе (10 значений Fa в файле с данными абсолютных наблюдений). В этом случае Fv-данные dIdD интерполируются на моменты измерения Fa, вычисляются 10 разностей Fa-Fv и среднее значение, которое и принимается как базисное значение F0 для данной серии. Если измерений Fabs за сутки было несколько (например, как видно по табл. 2, датчик абсолютного магнитометра POS-1 переставлялся на основной столб дважды), то выполняется усреднение по этим перестановкам и итоговое значение F0 используется для последующей обработки;

- если измерений на основном абсолютном постаменте не было (нет данных в файле с результатами абсолютных наблюдений), то в качестве текущего базисного значения F0 используется значение, записанное в файле **ini\_parameters\dFgrad\_current\_dIdD.dat**. При этом берётся ближайшее значение, предшествующее суткам, для которых выполняется обработка.

Скрипт выдаёт сообщение о том, как было получено текущее F0 и его величину. Кроме того, в данные используемого абсолютного скалярного магнитометра вводится две поправки — систематическая погрешность прибора (из файла **ini\_parameters\dFsys\_AbsHut.dat**) и редукция для приведения измерений Fa к основному абсолютному постаменту (из файла **ini\_parameters\dFgrad\_AbsHut.dat**; при измерении Fa непосредственно на абсолютном постаменте поправка принимается равной 0);

4) значения F(dIdD) приводятся к абсолютному столбу  $F_s = F_v + F_0$ ;

5) далее из данных dIdD (Fv, dD, dI) выбираются те, которые по времени ближе всего лежат к моментам абсолютных наблюдений. Ранее отмечалось, что по возможности, моменты нулевых показаний феррозондового датчика fDI д.б. синхронизированы с периодичностью вариационных измерений. На обсерватории "Паратунка" все непрерывно пишущие магнитометры синхронизированы между собой в отношении частоты измерений: феррозондовые магнитометры имеют периодичность измерений 1 с, скалярные магнитометры — 5 с, dIdD — 2.5 с. Поэтому устанавливая датчик fDI в "0" в моменты

времени, кратные 5 с, наблюдатель решает вопрос с синхронизацией. Если же по каким-то причинам такой синхронизации нет (например, при сильных возмущениях или пульсациях наблюдатель не может физически установить "0" fDI в требуемое время и фиксирует его в произвольный момент), то ошибка использования ближайшего значения вместо интерполированного не ожидается значимой;

6) по четверкам данных  $dD(k, k=1,2,3,4)$  и  $dI(k, k=1,2,3,4)$  для каждой серии абсолютных наблюдений вычисляются средние значения  $dDm$  и  $dIm$ , а затем и базисные значения  $D0=Da-dDm$ ,  $I0=Ia-dIm$ ;

7) выполняется вывод полученных данных в виде графиков (рис. 14):

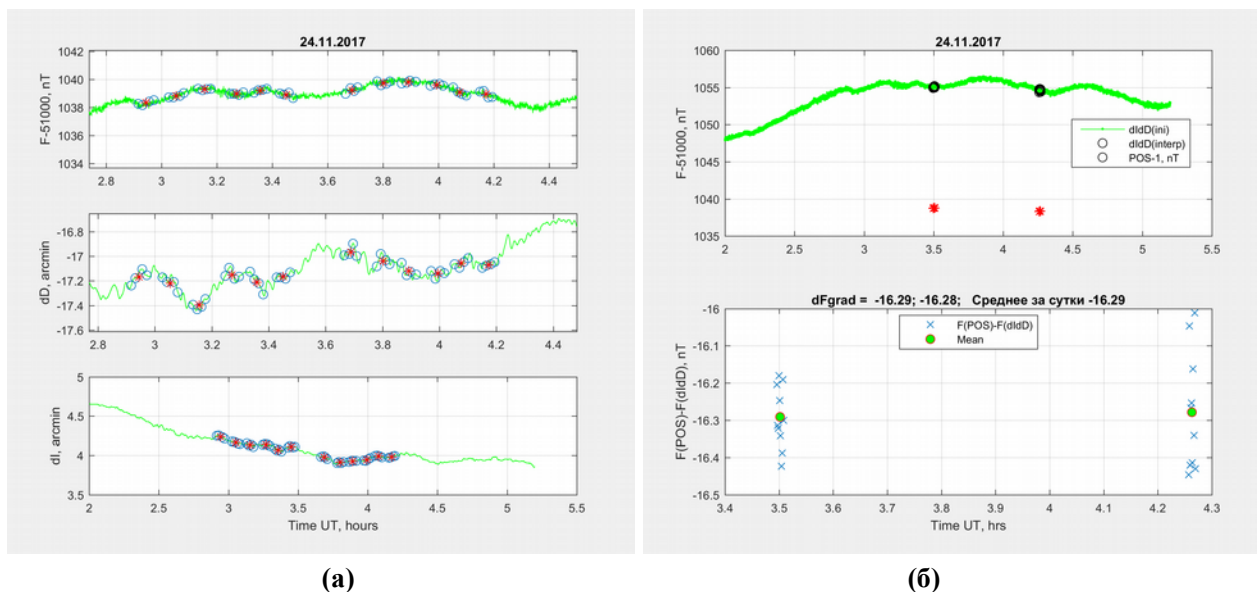


Рис. 14. Вид графических окон при вычислении базисных значений  $dIdD$ . Панель (а) — вариации  $Fv$ ,  $dD$  и  $dI$  (непрерывная линия), маркером "o" отмечены значения вариаций, совпадающие с моментами абсолютных измерений, маркером "\*" показаны средние значения вариаций и средние значения времени для каждой серии D- и I-измерений. Панель (б), на верхнем графике - исходные вариации  $Fv$  (зелёная кривая), маркером "o" отмечены значения  $Fv$ , совпадающие по времени с измерениями  $Fa$  на основном столбе в абсолютном павильоне, красными маркерами "\*" показаны значения  $Fa$ , на нижнем графике — разности  $Fa-Fv$  (маркер "x") и средние значения по десяти  $Fa$  (маркер "o").

и сообщений в командном окне MATLAB:

```
>> base_calc_didd
Обработка для даты - 24.11.2017
-----
Приведение данных POS-1 к DI-столбу ... +0.00
Система POS-1 ... +0.40
Используется вычисленный градиент dFgrad 2017 11 24 -16.29
Выводим базисные в файл? [y/n] ...
```

Этот этап очень важный для обработки. Скрипт останавливает выполнение и ждёт подтверждения от магнитолога на вывод данных в файл. При этой остановке магнитолог обязан тщательно проверить полученные результаты. Прежде всего, используются штатные возможности графического окна MATLAB по масштабированию (zoom) - необходимо увеличить кривые с отметками моментов абсолютных наблюдений и убедиться, что:

- символы "o" сгруппированы по 4, а средние значения (символы "\*") лежат внутри этих

групп (если не так, то скорее всего имеется ошибка при наборе времени — требуется сверить файл с данными наблюдений и журналом наблюдений);

- расстояния по времени внутри групп соизмеримы (если нет, то, возможно, была ошибка при наборе времени — требуется сверить файл с данными наблюдений и журналом наблюдений);

- значения  $F_v$ ,  $dD$  и  $dI$  не попадают на помехи или пропуски в данных  $dIdD$ . Если в вариационных данных были сильные помехи, и значения, отмеченными маркерами "o", попадают на эти помехи, то необходимо либо чистить данные  $dIdD$ , либо изменить время в файле абсолютных наблюдений, чтобы уйти с помехи (если она была короткой, например, в виде выброса);

- разброс значений  $F_a-F_v$  на рис. 14б (нижний график) лежит в пределах нескольких десятых нТл, и никакие отдельные значения (точки) не отлетают. Также средние значения  $F_0$  по раздельным установкам датчика на абсолютный столб должны быть близкими.

Если результаты представляются приемлемыми, магнитолог подтверждает их вывод в файлы;

8) рассчитываются инструментальные параметры  $fDI$ -магнитометра (коллимационные углы между феррозондовым датчиком и осью зрительной трубы теодолита в горизонтальной EAZ и вертикальной плоскостях ESI, смещение нуля электроники датчика ESO и разность  $GI$  оценок наклона по двум парам измерений ( $C+, IO-$ ) и ( $C-, IO+$ ), которые дают независимые значения  $I$ .

Результаты вычислений выводятся в пополняемые файлы, указанные в начале скрипта **base\_calc\_didd.m**. Примеры содержимого файлов с результатами вычислений представлены ниже

Файл **blv\_dIdD.dat**:

```
% Date   Ins UT(D)   D0      UT(I)   IO      c obs  dD(D)  dI(D)  F(D)    dD(I)  dI(I)  F(I)    F0
%         hr          D0      hr          I0      nT     (')    (')    nT     (')    (')    nT     nT
2017 11 24 28 2.944 -06 03 24 3.054 +65 22 43 1 8 -17.1690 +4.2360 52038.4 -17.2200 +4.1610 52038.8 -16.29
2017 11 24 28 3.156 -06 03 29 3.271 +65 22 41 1 8 -17.3955 +4.1310 52039.3 -17.1510 +4.1355 52039.0 -16.29
2017 11 24 28 3.358 -06 03 30 3.451 +65 22 43 1 8 -17.2110 +4.0680 52039.2 -17.1645 +4.1070 52038.9 -16.29
2017 11 24 43 3.688 -06 02 59 3.802 +65 22 40 1 8 -16.9665 +3.9765 52039.2 -17.0400 +3.9120 52039.7 -16.29
2017 11 24 43 3.892 -06 02 54 3.994 +65 22 41 1 8 -17.1195 +3.9270 52039.8 -17.1390 +3.9465 52039.6 -16.29
2017 11 24 43 4.077 -06 03 04 4.172 +65 22 42 1 8 -17.0550 +3.9915 52039.1 -17.0700 +3.9840 52038.9 -16.29
```

Здесь "Date", "UT(D)" и "UT(I)" – дата и средние моменты наблюдений склонения и наклона в серии; "Ins" — номер используемого  $fDI$ , "D0" и "I0" – базисные значения склонения и наклона, поля час:мин:сек разделены пробелами, чтобы при считывании файла использовать простейшую функцию **load()**; "C" – флаг качества наблюдения (1 — результаты серии используются при дальнейшей обработке, например, при вычислении Adopted-значений, 0 — считываются в память, но не используются); "Obs" – цифровой номер наблюдателя; "dDd", "dId", "Fd", "dDi", "dIi", "Fi" – средние значения вариаций  $dD$  и  $dI$  и модуля  $F$ ; "F0" – базисное значение модуля поля, среднее за сутки. В принципе, данные о базисных  $F_0$  выводятся в отдельный файл **dFgrad\_Obs\_dIdD.dat**, откуда они и берутся при дальнейшей обработке.

Файл **blv\_all\_dIdD.dat**:

```
% Date   UT(D)   D      dD(')   D0      UT(I)   I      dI(')   I0      F(D)    F(I)    dFgrad
2017.11.24 02:56.6 -06:20:34 -17.1690 -06:03:24 03:03.3 +65:26:52 +4.1610 +65:22:43 52038.4 52038.8 -16.29
2017.11.24 03:09.4 -06:20:53 -17.3955 -06:03:29 03:16.2 +65:26:49 +4.1355 +65:22:41 52039.3 52039.0 -16.29
2017.11.24 03:21.5 -06:20:42 -17.2110 -06:03:30 03:27.1 +65:26:49 +4.1070 +65:22:43 52039.2 52038.9 -16.29
2017.11.24 03:41.3 -06:19:57 -16.9665 -06:02:59 03:48.1 +65:26:35 +3.9120 +65:22:40 52039.2 52039.7 -16.29
2017.11.24 03:53.5 -06:20:01 -17.1195 -06:02:54 03:59.6 +65:26:38 +3.9465 +65:22:41 52039.8 52039.6 -16.29
```

2017.11.24 04:04.6 -06:20:07 -17.0550 -06:03:04 04:10.3 +65:26:41 +3.9840 +65:22:42 52039.1 52038.9 -16.29

Эти данные повторяют файл **blv\_dIdd.dat**, но немного в другом формате, с разделителями полей типа ":". Он более воспринимаемый при визуальном просмотре, но неудобный для считывания средствами MATLAB.

Файл **blv\_sensor\_dIdd.dat**:

% %	Date	Ins	UT	EL(D) (°)	EL(I) (°)	AZ(D) (°)	SM(D) nT	SM(I) nT	dI (°)	c	obs
2017	11	24	28	2.944	-2.31	-0.24	-4.46	5.13	7.50	1	8
2017	11	24	28	3.156	-2.22	-2.31	-4.67	4.98	9.40	1	8
2017	11	24	28	3.358	2.19	-2.27	-4.64	5.05	4.64	1	8
2017	11	24	43	3.688	-8.62	8.27	-4.66	1.92	14.00	1	8
2017	11	24	43	3.892	8.46	8.22	-3.43	1.55	19.96	1	8
2017	11	24	43	4.077	-8.46	8.20	-3.23	0.39	11.50	1	8

Здесь собраны данные об инструментальных параметрах fDI-магнитометра, которые используются при абсолютных наблюдениях. "EL(D)" и "EL(I)" — коллимация феррозондового датчика в вертикальной плоскости (угол между осью датчика и осью зрительной трубы), вычисленная по результатам наблюдений склонения и наклона; "AZ(D)" — коллимация датчика в горизонтальной плоскости, "SM(D)" и "SM(I)" — смещение нуля электроники феррозондового датчика; "dI" — разность двух независимых оценок наклона, которые м. б. получены из измерений в четырёх положениях.

Файл **blv\_dIdd.dat** является основным, поскольку данные из него используются для дальнейшей обработки. Он пополняемый и, в принципе, должен включать результаты всех определений базисных значений для данного вариометра. На обсерватории "Паратунка" в нём представлены базисные значения с 17.11.2012 г., т. е. с момента начала регулярных измерений с помощью dIdd. Необходимо помнить, что если были сделаны повторные вычисления с выводом результатов в файлы, то необходимо удалить повторяющиеся записи, чтобы исключить влияние дублирования при оценке принятых базисных значений. Поскольку файлы имеют обычный текстовый формат, то рекомендуется для редактирования использовать простые текстовые редакторы, подобные "Блокноту" MS Windows.

### 1.2.1.2. Визуализация результатов вычислений, получение Adopted-базисных значений

Завершающий этап процедуры вычисления базисных значений включает просмотр результатов за определённый период, в том числе, сопоставление текущих результатов с результатами предыдущих наблюдений. Сюда же входит оценка принятых базисных значений (на каждые сутки), необходимых при вычислении полных значений составляющих вектора магнитного поля.

Используется скрипт **base\_plot\_didd.m**. После его запуска и инициализации постоянных, выполняется запрос на ввод даты, начиная с которой будут обрабатываться ряды базисных значений. Последовательно выполняются следующие процедуры:

- 1) считывается файл базисных значений **blv\_dIdd.dat** и данные ограничиваются интервалом от заданной даты до последней записи в файле;
- 2) формируется массив индексов по наблюдателям и инструментам, при обязательном значении "1" флага качества измерения "C". Например, вектор индексов k28\_8 имеет размер, равный длине ряда данных, и заполнен значениями "1", если наблюдатель "8", инструмент "28" и результаты приняты как достоверные (флаг C=1). Система индексации массивов в



MATLAB работает так, что при обращении к массиву  $D0(k28\_8)$  будут показаны только достоверные базисные значения, полученные указанным выше наблюдателем на указанном fDI-магнитометре. Возможность такой индексации позволяет легко выводить на графики требуемые данные и маркировать их различными символами;

3) учитываются скачки в базисных значениях. Учёт скачков — это специальная технология, используемая в данном ПО для всех вариационных магнитометров и позволяющая адекватно работать с рядами, содержащими скачки. Основная причина её использования — необходимость аппроксимации рядов базисных значений со скачками непрерывными гладкими функциями. Подробно вопрос о скачках и методах получения принятых базисных значениях рассмотрен в Отступлении I. Перед запуском скрипта **base\_plot\_didd.m** магнитолог имеет возможность выбрать вариант визуализации и расчёта принятых базисных значений как с учётом скачков, так и непосредственно по исходным данным. Информация о дате, времени и величине скачка в каждой из составляющих заносится обработчиком в специальный текстовый файл (индивидуальный для каждой обсерватории, в название файла введён код обсерватории) **ini\_parameters\base\_jumps\_dIdD\_KHB.dat**, пример нескольких записей представлен ниже:

```
% YY MM DD hh mm ss      D0j      I0j      dFgrad
%                          UT      arcmin  arcmin  nT
2015 06 07 00 00 00 -05.900 +07.100 +00.80 % после ремонта крыши
2015 07 15 04 00 00 +00.600 -00.500 +00.00
2015 07 29 00 00 00 -01.000 +00.000 -00.40
2015 11 24 00 00 00 -00.800 +00.870 -00.20 % настройка dIdD
```

4) вычисляются средние за сутки наблюденные значения (по индексам наблюдателей, fDI-магнитометров и флагам качества наблюдений). В каком-то смысле эта процедура имеет исторические корни, когда были некоторые ограничения на обработку непосредственно первичных базисных значений. Кроме того, при подготовке итоговых (Definitive) данных за год представляется более целесообразным в файл базисных вводить только одно среднее суточное значение, а не 3-6 индивидуальных значений за сутки, тем более, что в этом файле не указывается время абсолютных наблюдений. Отметим, что существует модификация скрипта, вычисляющая не одно принятое базисное значение в сутки, а на каждую минуту. В этом варианте, конечно, усреднение наблюденных значений за сутки не делается;

5) в командном окне выводятся принятые базисные значения  $D0$ ,  $I0$ ,  $F0$  за заданное количество суток от текущей даты (или от даты, заранее заданной в скрипте).

```
>> base_plot_didd
С какой даты рисуем [DD.ММ.YYYY] ..... 01.11.2017
Аппроксимация базисных D0,I0 на последние 5 сут.:
2017 12 25 -363.81 +3922.41
2017 12 26 -363.64 +3922.42
2017 12 27 -363.46 +3922.44
2017 12 28 -363.29 +3922.45
2017 12 29 -363.13 +3922.47
Аппроксимация градиента dFgrad на последние 5 сут.:
2017 12 25 -16.72
2017 12 26 -16.63
2017 12 27 -16.58
2017 12 28 -16.56
2017 12 29 -16.56
```

Технология получения принятых базисных значений (аппроксимация наблюденных данных) описана в Отступлении I. Необходимо отметить, что базисные значения модуля поля  $F0$  занимают особое место среди базисных для других элементов поля. Модуль  $F$  измеряется с помощью скалярных магнитометров (протонных и Оверхаузеровских, реже — квантовых), которые по сути являются абсолютными, которые достаточно стабильны по отношению к



внешним факторам, например, к изменению температуры, ориентации, колебаниям и т. п. Соответственно, базисные  $F_0$  также в целом более стабильны и фактически описывают пространственный градиент  $F$  между точками установки скалярного и абсолютного магнитометров. Поэтому часто базисные значения  $F_0$  называют градиентом  $F$ , как показано на выводе скрипта выше;

б) рисуются графики базисных значений (см. рис. 15). Анализ этих графиков является важным этапом работы магнитолога. Если вывод делается непосредственно при обработке результатов текущих абсолютных измерений, то наблюдатель должен оценить качество своих результатов, сравнивая их с базисными, полученными в предыдущих наблюдениях. Некоторые особенности описываются ниже:

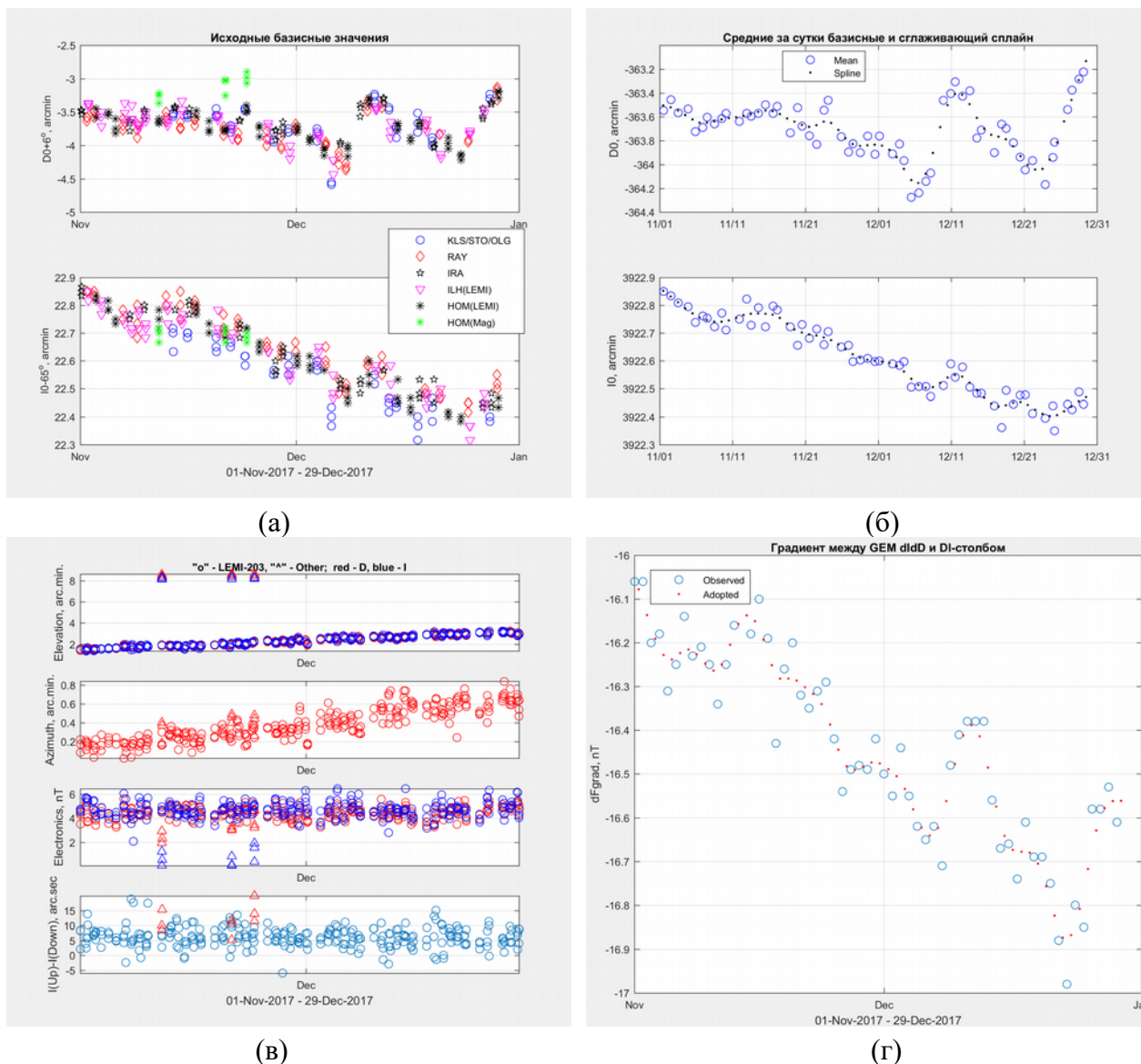


Рис. 15. Визуализация базисных значений магнитометра dIdD обсерватории "Паратунка". (а) — индивидуальные (наблюдённые) базисные  $D_0$ ,  $I_0$  для разных наблюдателей (OLG, RAY, IRA, ILH, HOM) и двух fDI-магнитометров (LEMI - основной и MAG — резервный); (б) — среднесуточные наблюдённые (Mean) и принятые (Spline) базисные  $D_0$  и  $I_0$ ; (в) — инструментальные параметры fDI-магнитометров; (г) — среднесуточные наблюдённые и принятые базисные значения  $F_0$  (пространственный градиент  $F$ ).

- все текущие результаты образуют плотную группу, но заметно отличаются от предыдущих, с учетом возможного объективного тренда. Это может говорить о реальном изменении базисных значений по той или иной причине — наблюдателю необходимо выяснить, не проводились ли технические работы с вариометром, не проводились ли работы, из-за которых могло измениться распределение магнитного поля в павильоне, не было ли на момент наблюдений резких и сильных изменений температуры в павильоне или на улице, не было ли отключений электроэнергии перед наблюдениями и других подобных причин. Также значительное отклонение всех текущих результатов может говорить о проблемах при абсолютных наблюдениях, например, пониженное питание электроники fDI-магнитометра, ошибка показаний используемых часов при наличии сильных постоянных изменений поля во время наблюдений, наличие стальных предметов на наблюдателе или занесённых им в абсолютный павильон, проблемы с отсчётной системой теодолита и другие. Значительную помощь в идентификации проблемы даёт анализ графиков инструментальных параметров — заметные отклонения в большой степени указывают на проблемы именно с fDI-магнитометром, параметр GI чувствителен к магнитному загрязнению в окрестности fDI-прибора.

Отметим, что на многих обсерваториях используемый для абсолютных наблюдений скалярный магнитометр находится постоянно в абсолютном павильоне и выполняет измерения в непрерывном режиме. Сопоставление его записей  $F_a$  с данными скалярного магнитометра  $F_s$ , установленного в другом павильоне, является очень эффективным средством для контроля магнитной обстановки в абсолютном павильоне: стальные предметы на наблюдателе будут давать увеличение шума в разности  $F_a - F_s$  из-за перемещения наблюдателя во время абсолютных наблюдений, магнитоэффективные предметы, занесённые в абсолютный павильон и неподвижные во время наблюдений, дадут скачок в  $F_a - F_s$ . Необходимо также учитывать базисные значения других вариометров, которые вычисляются в это же время (на обсерватории "Паратунка" это вариометры dIdD, FGE-DTU, FRG-601 и POS-4) и различаются физическими принципами, на которых основаны их измерительные датчики) — если поведение базисных значений двух-трех вариометров близки, значит причина скорее всего именно в абсолютных наблюдениях. Если же изменения базисных значений для разных вариационных магнитометров различаются, то причину нужно искать прежде всего в вариационных измерениях;

- текущие результаты в целом лежат в общем тренде базисных за длительный период, но имеют большой разброс. Основная причина этого — ошибки в данных, чаще всего при наборе информации из журнала наблюдений в файл, реже — при записи в журнал непосредственно в процессе наблюдений. Наблюдатель должен ещё раз внимательно сравнить данные в журнале и в файле, сопоставить исходные данные (отсчёты по шкалам горизонтального и вертикального кругов, отсчёты на Миру и др.) в разных сериях и с предыдущими наблюдениями

Если объяснение заметных отклонений базисных от общего хода кривой не найдено, то в отдельные выпадающие результаты необходимо пометить флажком "0" в файле базисных **blv\_dIdD.dat**. Если выпали все результаты текущего наблюдения, то решение о приемлемости или неприемлемости этих результатов обычно принимается после новых наблюдений, когда становится ясно, были ли изменения базисных объективными или вызваны ошибками данных наблюдений.

В отношении приведённых на рис. 15 результатов можно отметить следующее:

- 9 декабря имеется скачок  $D_0$  на  $+0.5'$ , основная причина - резкое потепление, температура на улице из-за циклона за несколько часов выросла с  $-15^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$  и продержалась на этом уровне более четырёх суток. Этот температурный эффект известен для магнитометра dIdD на обсерватории "Паратунка", хотя нет однозначного вывода о том, что это влияние температуры непосредственно на аппаратуру — это частично подтверждается и поведением базисного значения  $F_0$ , которое в декабре меняется синхронно с  $D_0$ . Рост  $D_0$  после 23 декабря также во многом м.б. объяснён потеплением;

-  $D_0$  наблюдателя НОМ на dfDI-магнитометре Mag-01H в декабре примерно на  $0.5'$  превышают средний уровень  $D_0$ , полученных на основном fDI-магнитометре LEMI-203. Это результат систематической погрешности абсолютных измерений  $D$  с помощью Mag-01, что подтверждается его сверками с fDI-магнитометрами обсерваторий "Патроны" (IRT, ИСЗФ СО АН, г. Иркутск) и "Арти" (ARS, ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург);

- у наблюдателя OLG в декабре несколько суток по наклонению  $I_0$  заметно выпадают из общего ряда  $I_0$ . Это проявление личной систематической погрешности, хотя она и не стабильна. Причина — в проблеме считывания наблюдателем отсчётов со шкалы вертикального круга теодолита ЗТ2КП fDI-магнитометра LEMI-203. В данном случае проблема осложняется тем, что эта ошибка нерегулярна и не позволяет учесть её введением соответствующей поправки;

7) после принятия решения о приемлемости полученных базисных значений, магнитолог вносит принятые базисные значения, полученные на текущие и предыдущие сутки, в специальные файлы **Baseline\_current\_dIdD.dat** и **dFgrad\_current\_dIdD.dat**, содержимое которых показано ниже:

Baseline\_current\_dIdD.dat

%	Date	$D_0(')$	$I_0(')$
	2012 11 17	-367.13	+3920.67
	2012 11 18	-367.18	+3920.67
...			
	2017 12 28	-363.27	+3922.47
	2017 12 29	-363.13	+3922.47

dFgrad\_current\_dIdD.dat

%	Date	dFgrad, nT
	2012 11 17	-10.24
	2012 11 18	-10.18
...		
	2017 12 28	-16.47
	2017 12 29	-16.56

Базисные значения из этих файлов в дальнейшем используются при обработке результатов вариационных измерений с помощью магнитометра dIdD и вычисления минутных значений в статусе Reported, Adjusted или Definitive (INTERMAGNET).

### 1.2.1.3. Отступление I. Принятые базисные значения и скачки

Как известно, стандартами INTERMAGNET определены два класса базисных значений: наблюденные (Observed), которые получены непосредственно при абсолютных измерениях, распределены неравномерно по времени и содержат ошибки наблюдений, и принятые (Adopted), которые находятся на каждые сутки (как минимум) и, в общем случае, являются сглаженными, т. е. с частично

убранными случайными ошибками. Известны различные способы получения принятых базисных значений:

- аппроксимация кусочно-постоянными рядами, когда на каждом определённом интервале времени все значения базисных будут неизменными, а на границах интервалов смена базисных происходит скачком. Понятно, что физически такой метод не оправдан, и его использование во многом обусловлено исторически — когда принятые базисные значения оценивались визуально по графику. Однако, именно этот метод при скачках в рядах базисных позволял учесть эти нарушения непрерывности наиболее адекватно, т. к. естественным образом вводил скачок и в принятые базисные;

- аппроксимация кусочно-линейными функциями — развитие предыдущего метода, используя на различных фрагментах данных линейную аппроксимацию. Возникающие на стыках фрагментов изломы аппроксимирующей функции не имеют под собой физического смысла;

- аппроксимация полиномами различной степени — достаточно распространённый метод, однако его физическое обоснование крайне низкое. Скорее это просто удобный и доступный способ, реализованный во многих простых и распространённых математических пакетах, например, в таблицах MS Excel, и в математических библиотеках для различных языков программирования, например, в библиотеке NAG для Фортрана. Однако, ясно, что полиномы плохо описывают реальное поведение базисных, например, при широко распространённых сезонных вариациях, при быстрых локальных изменениях или скачках. Последние при аппроксимации полиномами просто сглаживаются, создавая неучтённые (скрытые) изменения в виде колебаний. Попытки увеличивать степень используемых полиномов всё дальше уводит их от изначального физического смысла;

- имеются попытки использовать для аппроксимации сложные составные модели, например, полином + тренд + сезонные колебания. Такие модели хорошо наполнены физическим смыслом, однако сложны для практической реализации и имеют проблемы с правильным представлением скачков;

- современные математические пакеты типа MATLAB или Wolfram Mathematica имеют мощный аппарат для аппроксимации рядов со сложной структурой, в том числе алгоритмы, основанные на адаптивных и непараметрических методах. Один из таких алгоритмов — сглаживающий кубический сплайн, который реализован в пакетах MATLAB и Octave в виде встроенной функции `csaps()`, и который становится всё более популярным. Функция использует единственный параметр  $p$ , определяющий степень сглаживания: при  $p=0$  аппроксимирующая функция представляет собой просто прямую линию, параметры которой определяются методом наименьших квадратов, при  $p=1$  данные аппроксимируются натуральным сплайном, проходящим через каждую точку наблюдаемых значений. Конечно, физический смысл этой аппроксимации не столь очевиден, но несомненным достоинством является гибкость метода в отношении исходных данных — адаптивность. При реальном применении могут возникать некоторые трудности, если исходные данные на разных фрагментах различаются степенью изменчивости и возникает необходимость их аппроксимации с различной

глубиной сглаживания. Кроме того, метод не решает проблему скачков, даже если использовать  $p=1$ .

Как видим, современные вычислительные средства дают разнообразные возможности для получения принятых базисных значений по наблюдаемым. Однако при наличии скачков эффективность резко падает и возникает ситуация, когда простейший, по сути реализуемый вручную, метод аппроксимации кусочно-постоянной функцией оказывается предпочтительнее. Чтобы решить эту проблему, нами используется достаточно простой и логичный подход, заключающийся в том, что из исходных данных скачок исключается — все данные, предшествующие скачку, увеличиваются или уменьшаются на величину скачка. Эта процедура распространяется на все эпизоды в пределах анализируемого ряда, при этом данные после скачка не изменяются. Затем выполняется аппроксимация таких "выровненных" рядов тем или иным методом (мы используем функцию `csaps()`) и скачки "восстанавливаются", т. е. наблюдаемые базисные значения приводятся к исходному состоянию. Аналогичная процедура "восстановления" применяется и к принятым (аппроксимированным) данным, вследствие чего на гладкой аппроксимирующей кривой возникает скачок, равный по величине тому, который использовался при обработке наблюдаемых базисных значений. Существует три момента:

- что принимать за скачок? Скачок в обобщённом смысле — резкое изменение состояния данных, в нашем случае это резкое изменение базисных значений. Величина "резкости" связана с периодичностью измерений и с характерными временами вариаций. "Классический" скачок — это значимое (выше шума в данных) изменение состояния между двумя соседними измерениями. Для вариационной записи такое определение вполне приемлемое. Однако для базисных значений требуется учитывать и временные особенности. Достаточно распространённая периодичность абсолютных наблюдений — раз в несколько суток, раз в неделю, а иногда и реже. Понятно, что при такой ситуации невозможно априори, без дополнительной информации, сказать, имел ли место скачок или за неделю базисные значения плавно изменились. В то же время, существуют процессы, которые в вариационных данных могут давать скачок, который растягивается на длительное время — например, резкое изменение температуры в вариационном павильоне при плановом включении или отключении нагревателей, может изменять уровень записи вариометра в течении нескольких часов;

- как определить величину и момент скачка? Поскольку мы обсуждаем вопрос о базисных линиях, то логично делать эти оценки по поведению именно базисных. Однако при редких (раз в несколько суток или реже) и имеющих относительно невысокую точность абсолютных наблюдениях это не всегда эффективно. В некоторых отношениях более результативными могут быть оценки скачка (время и амплитуда) непосредственно по данным вариометра, уровень записи которого и изменился скачком. Однако, при небольшой величине скачка может оказаться сложно выделить его на фоне естественных вариаций. Определённую помощь может дать анализ первых разностей данных вариометра. Но наиболее эффективным, конечно, является сравнение данных двух вариационных магнитометров — во многих случаях даже небольшие скачки до десятых долей нТл выделяются вполне надёжно — как по величине, так и по времени. Понятно,

что при выполнении плановых работ с аппаратурой, которые были причиной скачка, не составляет сложности определить момент его проявления;

- как быть, если скачок — в середине суток, а базисные — одно значение на сутки? Стандартом INTERMAGNET определено, что принятые базисные значения вычисляются по одному на сутки. Если скачок произошёл не на границе суток, что чаще всего и происходит в реальной практике, то вычисленные для этих суток базисные будут адекватно представлять ситуацию либо от начала суток до скачка, либо от скачка до конца суток. Соответственно, вычисленные полные составляющие поля будут иметь смещённый уровень либо до скачка, либо после. Таким образом, появляется необходимость специальной коррекции уровня полного значения требуемой составляющей — сдвиг по ординате на постоянное значение, равное величине вводимого скачка.

Все эти технологии реализованы в ПО, используемом на обсерваториях ИКИР ДВО РАН. На рис. 16 в качестве примера показаны базисные значения  $D_0$  и  $I_0$  магнитометра dIdD обсерватории "Хабаровск". 24 ноября 2015 г. была выполнена профилактика dIdD, вследствие которой уровень записи склонения  $D$  увеличился на  $0.80'$ , а уровень записи наклонения  $I$  уменьшился на  $0.87'$ , что привело к скачкам в базисных линиях. На рис. 16(а) показаны исходные (наблюдённые) и среднесуточные базисные, а также принятые  $D_0$ ,  $I_0$ , в которых искусственно введены скачки. На рис. 16(б) из наблюдённых и среднесуточных базисных скачки исключены и по ним сделана аппроксимация сглаживающим сплайном.

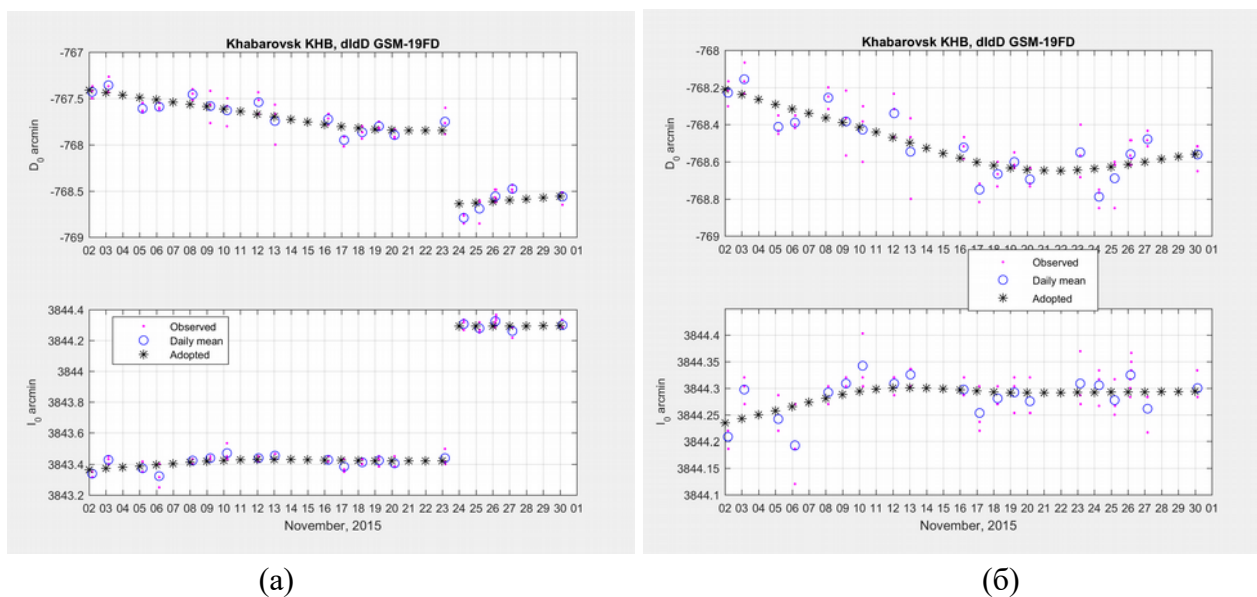


Рис. 16. Базисные значения  $D_0$ ,  $I_0$  магнитометра dIdD обсерватории "Хабаровск" с 1 по 30 ноября 2015 г. Показаны наблюдённые, средние за сутки и принятые базисные значения. (а) — базисные значения со скачком, (б) — скачок убран.

#### 1.2.1.4. Базисные значения HDZ-вариометра

Как отмечалось выше, вычисление базисных значений для вариометра, установленного в системе HDZ является более сложной процедурой (рис. 4), чем для DIF-вариометра. Это связано с тем, что для вычисления базисных  $H_0$ ,  $Z_0$  требуются абсолютные значения  $H_a$  и  $Z_a$ , которые непосредственно при абсолютных наблюдениях не определяются, а должны быть

вычислены. При этом имеются  $I_a$  и  $F_a$ , разнесённые по времени, поскольку одновременное получение этих элементов на абсолютном постаменте невозможно.

При наличии непрерывно измеряющего скалярного магнитометра процедура следующая:

- по абсолютным измерениям  $F_a$  на абсолютном постаменте и данным  $F_s$  вычисляется базисное значение  $F_0$ , отнесённое к моменту  $T_f$  установки абсолютного скалярного магнитометра на абсолютный столб;

- полагая, что  $F_0$  не изменяется за время между моментами  $T(f)$  и  $T(i)$ , " $i$ " - время измерения наклона  $I$ , вычисляется  $F_a(i)$  по  $F_s(i)$  и  $F_0$ :  $F_a(i) = F_s(i) + F_0$ ;

- по  $F_a(i)$  и  $I$  вычисляются абсолютные значения  $H_a$  и  $Z_a$ .

На обсерватории "Паратунка" вариант HDZ-ориентации представлен магнитометрами FGE-DTU, MAGDAS и FRG-601. Скалярный магнитометр GSM-90 подключён к единому регистратору с FGE, что обеспечивает синхронизацию измерений вариаций  $dH, dD, dZ$  и модуля  $F$ .

Рабочий каталог:	<b>d:\Paratunka\FGE_GSM\DI</b>
Файл инициализации:	<b>d:\Paratunka\ini_parameters\fge_ini.m</b>
Папка с файлами первичных данных:	<b>d:\Paratunka\Data\FGE_GSM\momwe\fge\2017</b> <b>d:\Paratunka\Data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017</b>
Скрипт для вычислений:	<b>base_calc_fge.m</b>

После запуска скрипта и ввода даты выполняется следующее:

- 1) считывается файл с инициализационными параметрами;
- 2) считываются первичные данные GSM-90. Имена файлов данных определены разработчиком и имеют вид `\gsm\2017\f2017328.pe0` или в общем виде `fYYYYdoy.pe0`, где `YYYY`, `doy` – год и номер дня в году. Используется функция `scalar_gsm_read_fun()`:

```
[Ts,fs]=scalar_gsm_read_fun(file_gsm,dt_gsm);
```

здесь `dt_gsm = 5` с — периодичность измерений с помощью GSM-90. Формат файла с первичными данными — бинарный, так что при считывании используется функция низкоуровневого чтения данных `fread()` в системе MATLAB;

- 3) проверяется и при необходимости корректируется время измерений. При измерениях с помощью FGE эпизодически, несколько раз в год, возникают проблемы с синхронизацией таймера регистратора Magdalog со временем UTC, вероятно, вызванные сбоями встроенного GPS-приёмника. При этом коррекция таймера не выполняется, уход от точного времени составляет около 1 с за сутки. Подобная проблема наблюдается у подобного комплекта FGE+GSM+Magdalog и на обсерватории "Магадан". Нормальная синхронизация восстанавливается либо сама собой, либо принудительно, после перезапуска всей системы измерений этими магнитометрами. Понятно, что за несколько суток уход может составлять десятки секунд и требуется коррекция записанных в файлы данных моментов измерений.

Практически это реализовано следующим образом. Имеется специальный текстовый файл `\ini_parameters\Correct_timer_FGE_GSM.dat`, в котором занесены величина поправки таймера для каждых суток (фрагмент представлен ниже):

```
% YY MM DD hh mm ss.sss    YY MM DD hh mm ss.sss    dT
%                               sec
2017 09 23 00 00 00.000    2017 09 23 23 59 59.999    -0015.0
2017 09 24 00 00 00.000    2017 09 24 04 50 59.999    -0015.0
```

где записаны начальная и конечная даты и время, а также величина корректирующей поправки времени. Поскольку периодичность измерений GSM-90 составляет 5 с, то дискретность поправки таймера также принята 5 с. Таким образом, максимальная погрешность времени измерений достигает 5 с. При обработке данных FGE-GSM вызывается функция `correct_time_fun()`, которая считывает файл с поправками и корректирует время, если для данной даты есть соответствующая запись;

4) из данных  $F_s$  GSM-90 убираются импульсные помехи (выбросы, spikes). Подробности описаны в Отступлении II. Порог срабатывания для GSM установлен 5 нТл;

5) если абсолютные измерения  $F$  в обрабатываемых сутках не выполнялись, то текущее базисное значение  $F_0$  берется из файла `ini_parameters\dFgrad_current_fge.dat`. Если в файле с результатами абсолютных наблюдений имеется информация об  $F_a$ , то вычисляется базисное значение для скалярного магнитометра GSM-90 как  $F_0 = F_a - F_s$ . При этом в  $F_a$  вводятся редукции — приведение к абсолютному постаменту (при измерениях непосредственно на этом постаменте поправка равна 0) и систематическая погрешность (например, для магнитометра POS-1, используемого в качестве абсолютного, поправка принята 0.4 нТл), которые записаны в файлах `ini_parameters\dFgrad_AbsHut.dat` и `ini_parameters\dFsys_AbsHut.dat`;

6) полученное базисное значение  $F_0$  используется как постоянное за все текущие сутки и с его помощью данные  $F_s$  скалярного магнитометра GSM-90 приводятся к абсолютному постаменту  $F_s + F_0$ ;

7) считываются вариационные данные  $dH$ ,  $dD$ ,  $dZ$  магнитометра FGE. Используется функция `var_fge_read_fun()`. Результаты измерений FGE записываются в бинарные файлы с именами вида `\Data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017\v2017328.pe0`, аналогично файлам для GSM-90. Существенное отличие компонентного вариационного магнитометра FGE от скалярного GSM-90 в том, что данные  $F_s$  имеют абсолютный смысл и выводятся из консоли в цифровом виде, в то время как сигнал FGE в аналоговом виде поступает на регистратор Magdalog, где и выполняется его оцифровка. При этом разработчиком определены ряд параметров вариометра, такие как коэффициенты преобразования магнитных каналов в нТл и температурных в °C, неортогональность датчиков H, D, Z и др. Задание этих параметров выполняется с помощью функции `fge_adc_coeff()`. При считывании данных FGE также выполняется коррекция помехи, которая возникает от работы GSM-90 (подробности представлены в Отступлении III);

8) выполняется коррекция меток времени, аналогично тому, как это делалось для моментов измерений GSM-90;

9) далее из данных FGE ( $dH, dD, dZ, F_s$ ) выбираются те, которые по времени ближе всего лежат к моментам абсолютных наблюдений, и по ним вычисляются средние значения на моменты наблюдения  $D_a$  и  $I_a$ :  $dH_m(D)$ ,  $dD_m(D)$ ,  $dZ_m(D)$ ,  $F_m(D)$ ,  $dH_m(I)$ ,  $dD_m(I)$ ,  $dZ_m(I)$ ,  $F_m(I)$ . Здесь



индексы "D" и "I" указывают к моментам времени каких абсолютных наблюдений (склонения или наклонения) относятся средние значения;

10) вычисляются средние абсолютные (полные) значения горизонтальной и вертикальной составляющих  $H_m(I) = F_m(I) \times \cos(I_a)$  и  $H_m(I) = F_m(I) \times \sin(I_a)$ ;

11) вычисляются базисные значения

$$\begin{aligned} D_0 &= D_a - dD_m(D), \\ H_0 &= \sqrt{(H_m(I))^2 - dD_m(I)^2} - dH_m(I), \\ Z_0 &= Z_m(I) - dZ_m(I). \end{aligned}$$

Сложный вид выражения для  $H_0$  обусловлен именно тем, что вариометр FGE ориентирован в системе HDZ. При установке компонентного магнитометра в такой системе после нивелировки блок датчиков вращается вокруг вертикальной оси до достижения в канале Y(D) значения 0. При этом ось X ориентирована в направлении на текущий магнитный север, а ось Y — перпендикулярно к оси X. Реально магнитный полюс постоянно движется, т. е. появляется угол между географическим и магнитным меридианами — вариация склонения  $dD$ . При этом магнитометр в канале H измеряет не вариацию вдоль вектора H, а вариацию проекции H на ось ранее установленного датчика. Для абсолютных значений картина обратная — мы с помощью абсолютных fDI- и скалярного магнитометров измеряем длину H именно вдоль направления на текущий магнитный полюс. А для получения базисного значения  $H_0$  необходимо получить проекцию этого абсолютного H на ось X вариометра — это и выполняется в формуле вычисления длины катета прямоугольного треугольника, в котором гипотенуза — это H-составляющая вектора поля, а известный катет — величина склонения, выраженная в "линейных" единицах, т. е. в нТл (по сути, непосредственно измеряемое вариометром значение  $dD$ );

12) рассчитываются инструментальные параметры fDI-магнитометра (коллимационные углы между феррозондовым датчиком и осью зрительной трубы теодолита в горизонтальной EAZ и вертикальной плоскостях ESI, смещение нуля электроники датчика ESO и разность GI оценок наклонения по двум парам измерений (C+, Ю-) и (C-, Ю+), которые дают независимые значения I;

13) результаты обработки выводятся в командное окно MATLAB

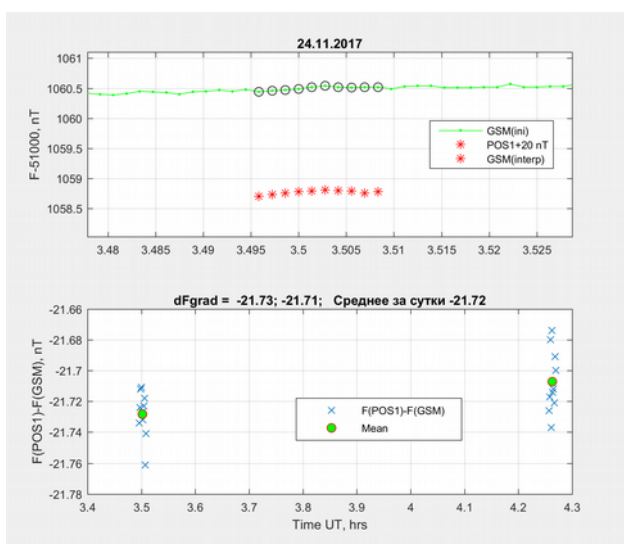
```
>> base_calc_fge
Обработка для даты - 24.11.2017
-----
... Считываются данные GSM ... d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017\f2017328.pe0
Приведение данных POS-1 к DI-столбу ... +0.00
Система POS-1 ... +0.40
Используется вычисленный градиент dFgrad 2017 11 24 -21.72
... Считываются данные FGE ... d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\fge\2017\v2017328.pe0
!!! ... Выполняется отбор данных FGE и GSM для заданных моментов ...
-----
INS      H0      Do'      Zo
28  21775.57 -286.9075 46833.49
28  21775.85 -286.9617 46833.38
28  21775.49 -286.9421 46833.56
43  21776.03 -286.4317 46833.20
43  21775.70 -286.3476 46833.35
43  21775.59 -286.5379 46833.51
-----
28  21775.64 -286.9371 46833.48
28      0.19   0.0275   0.09
Выводим базисные и градиент в файлы? [y/n] ... y
```

Здесь также вычисляются средние за сутки базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$  по наблюдениям на основном fDI-магнитометре LEMI-203 (№28) и стандартные отклонения. Результаты вычислений выводятся также в графическом виде (рис. 17). Графики подобны тем, что были описаны при вычислении базисных FDI-магнитометра на рис. 14, однако, они расширены. Так, для наглядности на рис. 17а,б выделены отдельные фрагменты с записями  $F_s$  и  $F_a$ , а также  $dZ$ . Кроме того, показаны итоговые базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$  (панель (в)) и разности  $\Delta F = F_a - F_v$ , где  $F_v$  вычислена по полученным базисным  $H_0$ ,  $Z_0$  и соответствующим вариациям. Как и в случае с вычислениями базисных для вариометра dIdD, магнитолог обязан внимательно просмотреть все графики, оценив корректность отображения данных по времени и амплитуде, и при необходимости повторить все вычисления после внесения исправлений в файл результатов абсолютных наблюдений.

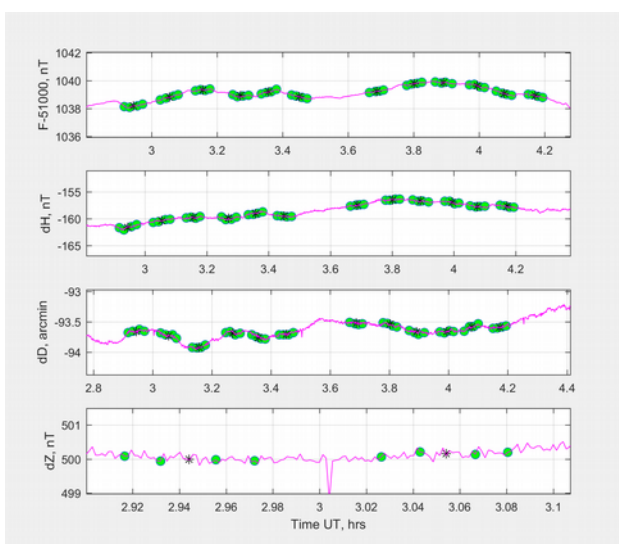
В отношении данных на рис. 17 можно отметить два момента:

- базисные значения  $D_0$ , полученные при наблюдениях с помощью fDI Mag-01H (панели (в)), имеют систематическое смещение вверх около  $0.5'$ . Это приборная погрешность данного магнитометра, о чём уже было сказано;

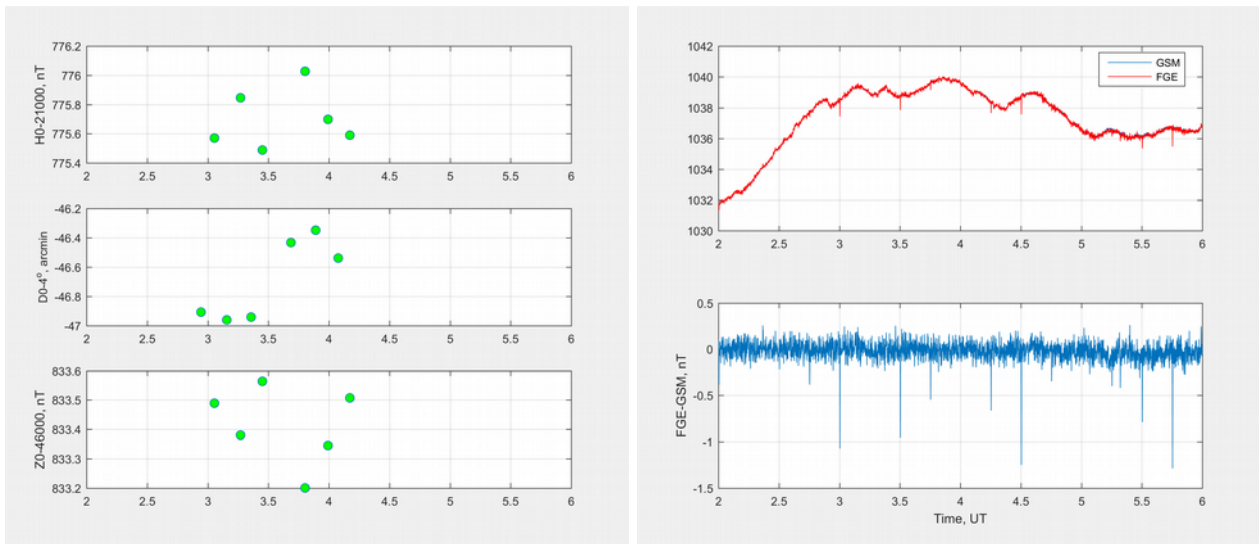
- на кривых  $dZ$  (панель (б)) и  $F_s$  и  $F_a - F_s$  (панель (г)) видны выбросы — это помехи, возникающие в данных FGE при вертикальном зондировании ионосферы с помощью ионозонда "Парус", периодичность сеансов 15 мин. Поскольку амплитуда выброса в  $dZ$  достигает 1 нТл, то при попадании отсчёта нулевого положения датчика при абсолютных наблюдениях наклонения на помеху среднее значение  $dZ_m(I)$  может уменьшиться от 0.25 нТл (один отсчёт совпал с помехой) до 1 нТл (если совпали все отсчёты, что достаточно маловероятно, т. к. продолжительность абсолютных наблюдений наклонения в одной серии обычно не больше 5 мин). В этом случае можно взять соседнее значение  $dZ$ , однако программно это не реализовано из-за усложнения логики скрипта при достаточно редких случаях, когда это требуется. Поэтому для ухода с помехи рекомендуется просто изменить на 5 с соответствующий момент времени в файле первичных результатов абсолютных наблюдений и восстановить после завершения обработки.



(a)



(б)



(В)

(Г)

Рис. 17. Вид графических окон при вычислении базисных значений  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ ,  $F_0$  для феррозондового компонентного магнитометра FGE и скалярного магнитометра GSM-90 обсерватории "Паратунка". Панель (а): на верхнем графике — вариации  $F_s$  (непрерывная линия), маркером "o" отмечены значения вариаций, совпадающие с моментами абсолютных измерений, маркером "\*" - абсолютные  $F_a$  (выделен фрагмент при первой установке датчика POS-1 на абсолютный столб); на нижнем графике разности  $F_a - F_s$  (индивидуальные "x" и средние "o"). Панель (б): исходные вариации  $F_s$ ,  $dH$ ,  $dD$  и  $dZ$  (сплошная кривая), маркером "o" отмечены значения вариаций, совпадающие по времени с измерениями на основном столбе в абсолютном павильоне, маркером "\*" - средние значения вариаций (по 4-м отсчётам) в средний момент времени (выделен фрагмент во время абсолютных измерений склонения в первой серии). Панель (в): базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ . Панель (г):  $F_s$  и значения  $F_v$ , вычисленные по вариациям и базисным (верхний график) и их разность (нижний график).

Результаты вычислений выводятся в пополняемые файлы, указанные в начале скрипта `base_calc_fge.m`. Примеры содержимого файлов с результатами вычислений представлены ниже

Файл `blv_fge.dat`:

%	YY	MM	DD	Ins	UT(D)	D0	UT(I)	H0	Z0	c	obs	dDd	dHd	dZd	F(d)	dDi	dHi	dZi	F(i)	dFgrad
%					hrs	d	hrs	nT	nT			nT	nT	nT	nT	nT	nT	nT	nT	nT
2009	09	22	28	4.665	-04 48 29	5.083	21766.13	46839.72	46839.72	1	5	-71.11	-67.2	-36.7	NaN	-70.65	-68.2	-37.8	51589.0	-24.9
2009	09	22	28	5.418	-04 48 37	5.643	21766.07	46839.73	46839.73	1	5	-70.34	-67.8	-38.1	51588.9	-70.15	-69.7	-38.6	51587.5	-24.9
2017	11	24	28	2.944	-04 46 54	3.054	21775.57	46833.49	46833.49	1	8	-93.66	-161.6	500.0	52038.2	-93.73	-160.4	500.2	52038.8	-21.72
2017	11	24	28	3.156	-04 46 58	3.271	21775.85	46833.38	46833.38	1	8	-93.92	-159.8	500.5	52039.3	-93.69	-159.9	500.0	52038.9	-21.72
2017	11	24	28	3.358	-04 46 57	3.451	21775.49	46833.56	46833.56	1	8	-93.76	-159.0	499.9	52039.2	-93.71	-159.5	499.8	52038.8	-21.72
2017	11	24	43	3.688	-04 46 26	3.802	21776.03	46833.20	46833.20	1	8	-93.52	-157.5	499.3	52039.2	-93.54	-156.4	499.5	52039.8	-21.72
2017	11	24	43	3.892	-04 46 21	3.994	21775.70	46833.35	46833.35	1	8	-93.67	-156.7	499.7	52039.9	-93.66	-156.9	499.6	52039.6	-21.72
2017	11	24	43	4.077	-04 46 32	4.172	21775.59	46833.51	46833.51	1	8	-93.58	-157.7	499.3	52039.1	-93.59	-157.7	499.0	52038.9	-21.72

Здесь "YY MM DD", "UT(D)" и "UT(I)" – дата и средние моменты наблюдений склонения и наклонения в серии; "Ins" — номер используемого fDI, "D0", "H0" и "Z0" – базисные значения склонения, горизонтальной и вертикальной составляющих, столбцы с полями час:мин:сек разделены пробелами, чтобы при считывании файла использовать простейшую функцию `load()`; "C" – флаг качества наблюдения (1 — результаты серии используются при дальнейшей обработке, например, при вычислении Adopted-значений, 0 — считываются в память, но не используются); "Obs" – цифровой номер наблюдателя; "dDd", "dHd", "dZd", "F(d)", "dDi", "dHi", "dZi", "F(i)" – средние значения вариаций  $dD$ ,  $dH$ ,  $dZ$  и модуля  $F$ ; "dFgrad" – базисное значение  $F_0$  модуля поля, среднее за сутки. В принципе, данные о базисных  $F_0$  выводятся в отдельный файл `dFgrad_Obs_FGE.dat`, откуда они и берутся при

дальнейшей обработке.

Файл **blv\_all\_fge.dat**:

```
% Date      UT(D)      D      dp'      D0      | UT(I)      I      F(I)      dFgrad      H(I)      dH      H0      Z(I)      dz      Z0
%
2009.09.22 04:39.9 -05:59:36 -71.108 -04:48:29 | 05:05.0 +65:07:20 51589.0 -24.9 21702.5 -068.2 21766.1 46801.9 -037.8 46839.7
2009.09.22 05:25.1 -05:58:57 -70.340 -04:48:37 | 05:38.6 +65:07:25 51587.5 -24.9 21700.9 -069.7 21766.1 46801.1 -038.6 46839.7
...
2017.11.24 02:56.6 -06:20:34 -93.663 -04:46:54 | 03:03.3 +65:26:52 52038.8 -21.7 21623.2 -160.4 21775.6 47333.6 +500.2 46833.49
2017.11.24 03:09.4 -06:20:53 -93.922 -04:46:58 | 03:16.2 +65:26:49 52038.9 -21.7 21624.0 -159.9 21775.8 47333.4 +500.0 46833.38
2017.11.24 03:21.5 -06:20:42 -93.762 -04:46:57 | 03:27.1 +65:26:49 52038.8 -21.7 21624.0 -159.5 21775.5 47333.3 +499.8 46833.56
2017.11.24 03:41.3 -06:19:57 -93.518 -04:46:26 | 03:48.1 +65:26:35 52039.8 -21.7 21627.6 -156.4 21776.0 47332.7 +499.5 46833.20
2017.11.24 03:53.5 -06:20:01 -93.669 -04:46:21 | 03:59.6 +65:26:38 52039.6 -21.7 21626.8 -156.9 21775.7 47332.9 +499.6 46833.35
2017.11.24 04:04.6 -06:20:07 -93.583 -04:46:32 | 04:10.3 +65:26:41 52038.9 -21.7 21625.9 -157.7 21775.6 47332.5 +499.0 46833.51
```

Этот файл содержит данные, подобные основному файлу **blv\_fge.dat**, но в другом формате, который в некоторых случаях более удобен для визуального просмотра. Также в нём записаны полные значения наклона, которые могут быть полезны при анализе нештатных результатов.

Файл **blv\_sensor\_fge.dat**:

```
% YY  MM  DD  Ins  UT      EL(D)'  EL(I)'  AZ(D)'  SM(D) nT  SM(I) nT  dI"  c obs
%
2009  9   22  28  4.665  NaN     25.70  NaN     NaN     -3.62  -4.92  1  5
2009  9   22  28  5.418  25.61   25.68  -2.86   3.54    -3.75  -5.32  1  5
...
2017 11  24  28  2.944  2.24    2.35  -0.27  -4.42   -5.10  -7.48  1  8
2017 11  24  28  3.156  -2.23   2.32  0.36   -4.67   -5.02  -6.75  1  8
2017 11  24  28  3.358  2.20    2.28  -0.31  -4.83   -5.18  -5.33  1  8
2017 11  24  43  3.688  -8.60   -8.32  0.45   -4.79   -2.01  -13.77  1  8
2017 11  24  43  3.892  8.46    -8.25  -0.44  -3.62   -1.52  -20.41  1  8
2017 11  24  43  4.077  -8.47   -8.28  0.27   -3.41   -0.46  -12.28  1  8
```

Здесь собраны данные об инструментальных параметрах fDI-магнитометра, которые используются при абсолютных наблюдениях. "EL(D)" и "EL(I)" — коллимация феррозондового датчика в вертикальной плоскости (угол между осью датчика и осью зрительной трубы), вычисленная по результатам наблюдений склонения и наклона; "AZ(D)" — коллимация датчика в горизонтальной плоскости, "SM(D)" и "SM(I)" — смещение нуля электроники феррозондового датчика; "dI" — разность двух независимых оценок наклона, которые м.б. получены из измерений в четырёх положениях. Эти данные представляют собой параметры fDI-магнитометра, т.е. практически не зависят от вариометра, для которого вычислялись базисные, а значит они сопоставимы для различных вариометров;

Файл **dFgrad\_Obs\_FGE.dat**:

```
% Date      F0, nT
2009 09 22 -24.88
2009 09 27 -24.58
...
2017 11 23 -21.69
2017 11 24 -21.72
2017 11 25 -21.68
```

Файл содержит средние за сутки базисные значения F0 (градиент между абсолютным столбом и местом постоянной установки скалярного магнитометра непрерывной записи GSM-90).

### 1.2.1.5. Визуализация результатов вычислений, получение Adopted-базисных значений

Завершающим этапом обработки абсолютных наблюдений является просмотр текущих результатов, их сравнение с предыдущими данными и получение принятых базисных

значений на текущие сутки. Процедура близка к той, которая описана в обработке FDI-магнитометра.

Используется скрипт **base\_plot\_fge.m**, после запуска которого иницируются параметры FGE и GSM-90, задаётся начальная дата, с которой рисуются базисные значения (при модификации скрипта можно также задать конечную дату — если необходимо просмотреть небольшой фрагмент старых данных), считывается основной файл с базисными **blv\_fge.dat**, формируются индексы по наблюдателям, fDI-магнитометрам и флагу "С" приемлемости данных для обработки. Кроме того, выполняются следующие процедуры:

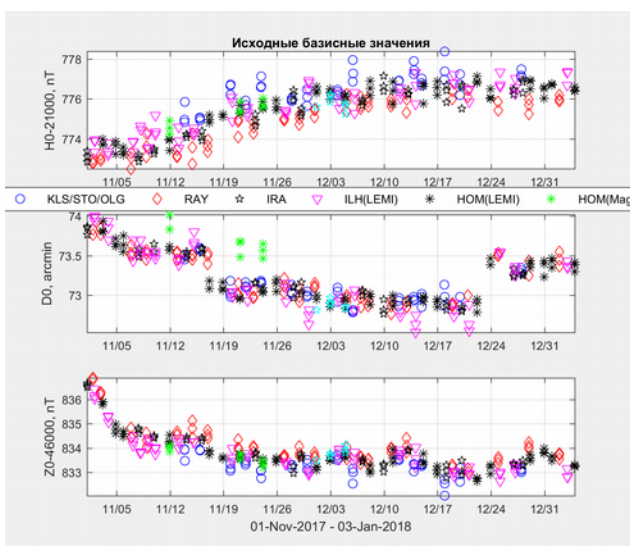
- из рядов базисных удаляются скачки (см. описание процедуры в Отступлении I), информация о скачках находится в файле **\ini\_parameters\base\_jumps\_FGE\_GSM.dat**, фрагмент записей за ноябрь-декабрь 2017 г. показан ниже:

%	YY	MM	DD	hh	mm	ss	H0j	D0j	Z0j	F0j		
%	UT						nT	arcmin	nT			
	2017	09	16	21	00	03	+00.00	-00.100	+00.00	+00.00	% после землетр.	
	2017	11	17	00	00	00	+00.70	-00.450	-00.30	+00.00	% посещение вар. пав.	
	2017	12	22	14	45	54	-00.57	+00.662	+00.30	+00.00	% после землетр.	

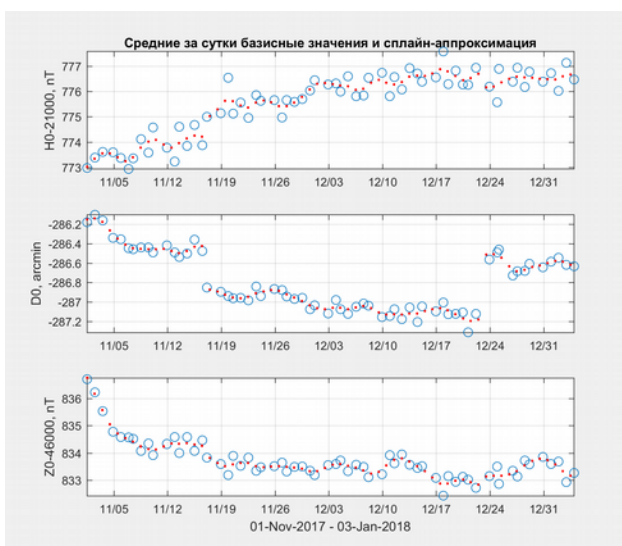
- вычисляются средние за сутки базисные значения и выполняется их аппроксимация сглаживающим сплайном с помощью функции **csaps()** с заданным параметром сглаживания (различные значения для базисных вариометра FGE и скалярного GSM-90);

- восстанавливаются скачки в исходных базисных, их среднесуточных значениях и в принятых на каждые сутки;

- выводятся графики базисных значений и инструментальных параметров fDI-магнитометров за заданный период. Как уже отмечалось, анализ этих графиков является важным этапом обработки результатов абсолютных наблюдений и требует тщательности от магнитолога. Основные моменты, на которые требуется обращать внимание, уже были описаны в разделе визуализации базисных значения FDI-ориентированного магнитометра.



(a)



(б)



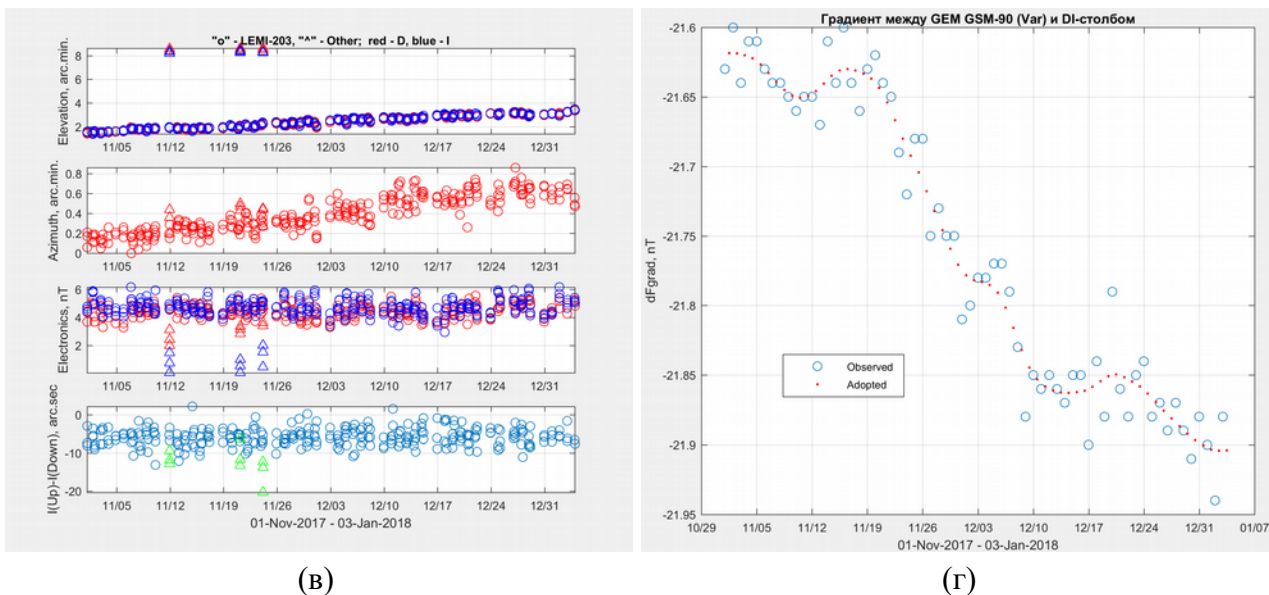


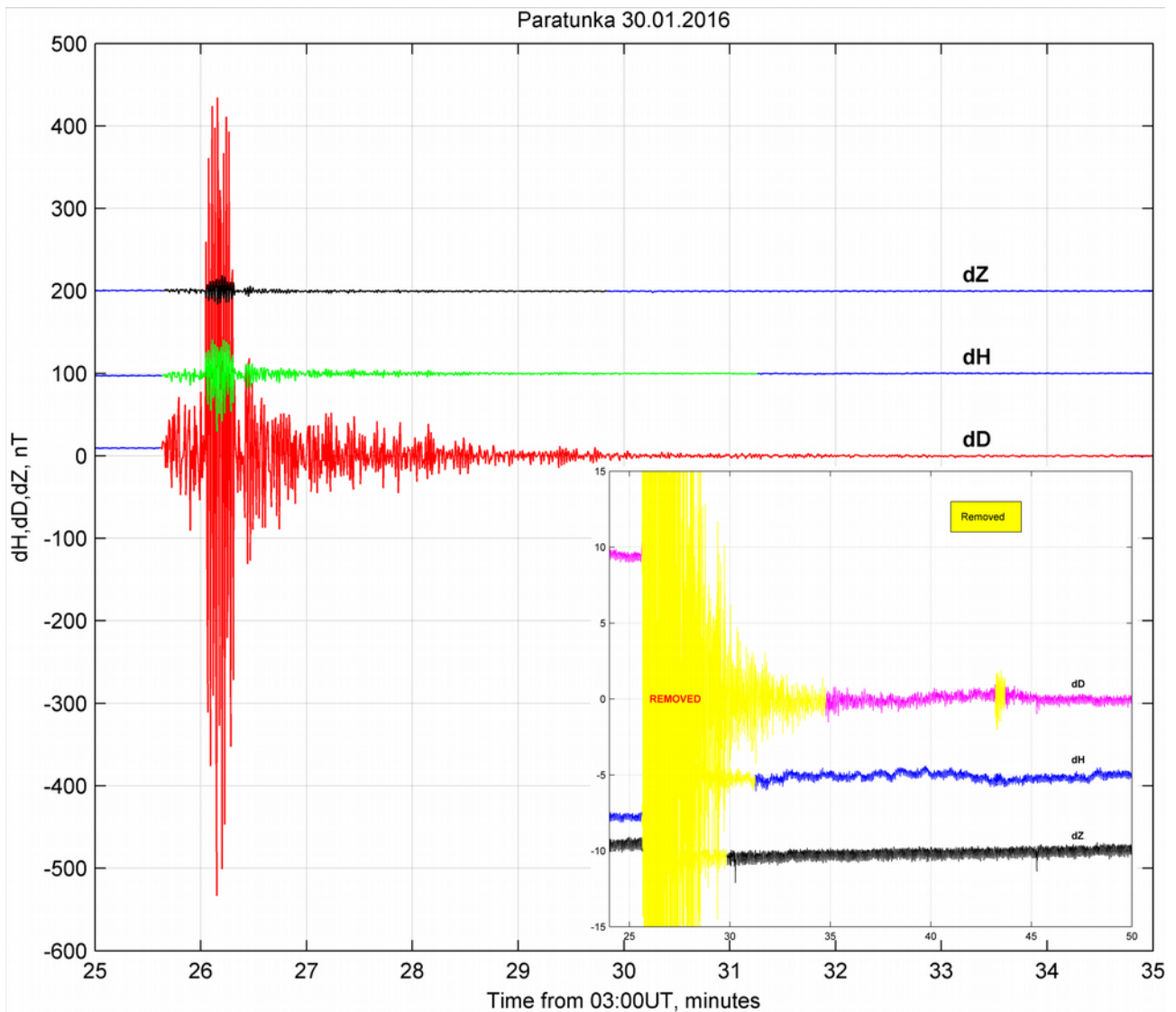
Рис. 18. Аналогично рис. 15, но для магнитометров FGE и GSM-90, базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$  и  $F_0$ , соответственно.

Такие особенности базисных значений, как, например, личные систематические погрешности, связанные с наблюдателем и/или fDI-магнитометром, т. е. зависят от абсолютных наблюдений, а не от вариометра, для которого вычисляются базисные. Соответственно, все упомянутые особенности будут проявляться на графиках базисных значений для различных вариометров — это видно при сопоставлении рис. 15 и 18. Конечно, это же относится и к инструментальным параметрам fDI-приборов. Данная особенность м.б. использована при анализе полученных данных, когда необходимо определить источник заметных отклонений отдельных базисных значений от среднего уровня.

Отметим некоторые особенности представленных на рис. 18 данных:

- в базисных значениях  $D_0$  хорошо заметны два скачка — примерно в середине ноября и в конце декабря. Эти скачки вызваны изменением базисных уровней вариометра FGE после землетрясений, что зафиксировано в журналах обработки и в файле с описанием скачков (см. выше). Скачки после землетрясений были не только в канале D этого вариометра, но также и в H- и Z-компонентах, но более слабые. Этот эффект проявлялся неоднократно после землетрясений, и связан с особенностью крепления блока феррозондовых датчиков — на карданном подвесе, в котором, вероятно, накапливаются некоторые напряжения, сбрасывающиеся при колебаниях подвешенных датчиков во время прохождения сейсмической волны под вариационным павильоном. Пример записи вариаций D во время сильного землетрясения 30 января 2016 г. с магнитудой 5.7 и эпицентром на расстоянии около 100 км показан на рис. 19. Во врезке хорошо видно, что после прохождения сейсмической волны уровни всех каналов изменились, при этом уровень D понизился почти на 10 нТл.

Необходимо отметить, что "сейсмический" эффект наблюдался и при других воздействиях на основание FGE — например, при расчистке наледи на пороге у входной двери вариационного павильона возникали вибрации, которые как и сейсмическая волна приводили к колебаниям подвешенной системы датчиков и смещению базового уровня записи;



**Рис. 19.** Скачки уровня записи H-, D-, Z-составляющих магнитометра FGE с подвешенными датчиками после сильного землетрясения. Во врезке для лучшего масштабирования показан фрагмент записи с ограничением по амплитуде, желтым цветом отмечены участки данных, которые были удалены при обработке.

- на рис. 18а хорошо видно, что в базисных  $H_0$  наблюдатель OLG (o) даёт систематически завышенные результаты, а наблюдатель RAY ( $\diamond$ ) систематически заниженные, в  $Z_0$  картина обратная. Основная причина — специфическая отсчётная система шкалы вертикального круга с не очень резкими штрихами. Как показали специальные совместные наблюдения (при независимом снятии несколькими наблюдателями показаний шкалы вертикального круга при неизменном положении теодолита) у OLG и RAY получаются смещения в отсчётах. Соответственно, возникают и систематические погрешности в базисных значениях  $H_0$  и  $Z_0$ , связанных с абсолютными определениями наклона. При этом личная систематическая погрешность RAY достаточно стабильная, что позволяет её учесть при подготовке квази-итоговых (Quasi-definitive) и итоговых (Definitive) данных.

По графикам на рис. 18 наблюдатель оценивает качество своих результатов. Если необходимо, выполняется полная переобработка (важно, чтобы в итоговых файлах с результатами вычисления базисных значений не было дублирующихся данных, возникающих при такой переобработке — они должны быть удалены вручную). Если результаты признаны

неприемлемыми, то они маркируются флагом "0" и в дальнейшем на графики не выводятся и в расчётах не принимаются во внимание. Если результаты нормальные, то оценки принятых (аппроксимированных на каждые сутки) базисных значений, которые скрипт выводит в командное окно MATLAB

```
>> base_plot_fge
С какой даты рисуем [DD.ММ.YYYY] ..... 01.11.2017
Аппроксимация базисных H0,D0,Z0 на последние 5 сут.:
2017 12 27 21776.77 -286.7089 46833.21
2017 12 28 21776.36 -286.6992 46833.61
2017 12 29 21776.63 -286.6135 46833.73
2017 12 30 21776.45 -286.6356 46833.82
2017 12 31 21776.58 -286.6072 46833.72
Аппроксимация градиента dFgrad на последние 5 сут.:
2017 12 27 -21.89
2017 12 28 -21.88
2017 12 29 -21.89
2017 12 30 -21.91
2017 12 31 -21.89
```

магнитолог заносит в специальные файлы \ini\_parameters\baseline\_current\_fge.dat

%	Date	H0(nT)	D0(amin)	Z0(nT)
	2009 09 22	21766.2	-288.570	46839.7
	2009 09 23	21766.4	-288.626	46839.6
	2009 09 24	21766.6	-288.681	46839.6
...				
	2017 12 29	21776.63	-286.6135	46833.73
	2017 12 30	21776.45	-286.6356	46833.82
	2017 12 31	21776.58	-286.6072	46833.72

и \ini\_parameters\dFgrad\_current\_fge.dat

%	Date	F0(nT)
	2009 09 22	-24.90
	2009 09 23	-24.89
	2009 09 24	-24.89
...		
	2017 12 29	-21.89
	2017 12 30	-21.91
	2017 12 31	-21.89

Данные из этих файлов используются при обработке суточных регулярных измерений и вычислении минутных значений в статусе Reported и Adjusted (стандарт INTERMAGNET).

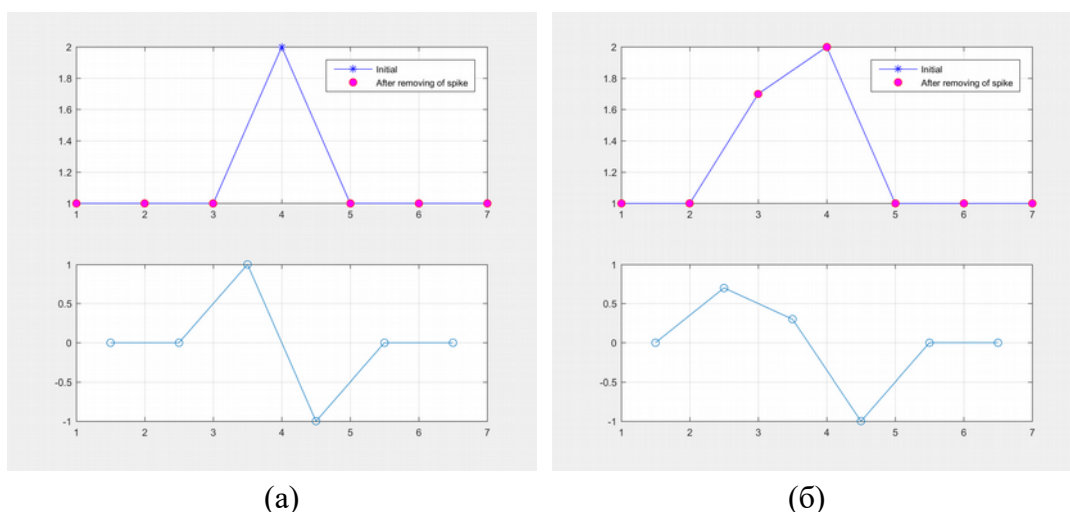
### 1.2.1.6. Отступление II. Удаление единичных выбросов

Проблема идентификации и удаления помех в данных измерений является актуальной и во многом нерешённой. Помехи в магнитных данных представляют собой большое разнообразие видов — шумоподобные, скачки, выбросы и т. п. Выбросы (помехи импульсного типа, spikes в англоязычной литературе) являются достаточно распространёнными помехами и, в то же время, наиболее простыми для автоматического распознавания и удаления.

В используемом в данном случае алгоритме под выбросом понимается единичное измерение - импульс, передний и задний фронты которого (разности с предшествующим и последующим значениями) близки по величине. Алгоритм достаточно просто реализован и основан на оценке первых разностей данных. Если соседние значения разностей превышают заданный порог и имеют разные знаки, то это измерение идентифицируется как выброс и заполняется



специальным символом NaN (Not-a-Number). Пример работы алгоритма показан на рис. 20. Видно, что пороге срабатывания 0.5 второй выброс не определяется и не удаляется.



**Рис. 20. Пример простого выброса: (а) — с возможностью идентификации и удаления; (б) — без возможности идентификации. Верхние панели — исходный и почищенный сигнал, нижние панели — первые разности исходного сигнала. Порог выделения задан на уровне 0.5.**

Важным моментом является выбор порога срабатывания. При больших значениях порога, например, 10 нТл, многие небольшие выбросы остаются не удалёнными. Однако, при низких значениях, менее 1 нТл, существует опасность удалить реальный сигнал, а не выброс, связанный с техногенными или другими подобными источниками. Сопоставление измерений различными магнитометрами позволяет сделать более реальную оценку величины порога срабатывания, в том числе, для конкретного прибора и для конкретных условий измерений.

Отметим также, что описанный выше алгоритм — простейший, не работающий даже при небольших отличиях помехи от изолированного импульса длительностью в один отсчёт. Конечно, существуют более сложные алгоритмы, однако, в реальной практике обсерваторской работы они почти не используются.

### 1.2.1.7. Отступление III. Наводки со стороны GSM-90

По неустановленной причине во всех каналах FGE наблюдается помеха от GSM-90, при поляризации его рабочего вещества. Проблема имеется для магнитометров FGE как на обсерватории "Паратунка", так и на обсерватории "Магадан". Пример помехи в Z-канале (частота измерений 2 Гц) представлен на рис. 21. Видно, что GSM-90 при измерениях создаёт прямоугольный сигнал в данных FGE, причём невозмущённый уровень приходится на верхнюю часть меандра, когда выполняется измерение частоты прецессии GSM-90, а нижняя соответствует времени при поляризации рабочего вещества. Амплитуда помехи достигает 0.4 нТл в Магадане и до 1 нТл в Паратунке. Очевидно, что минутные средние значения  $dZ$  будут систематически занижены, и есть шанс, что при некотором совпадении базисные могут быть систематически смещены на полную величину амплитуды помехи. Аналогичные колебания существуют и в других каналах FGE.

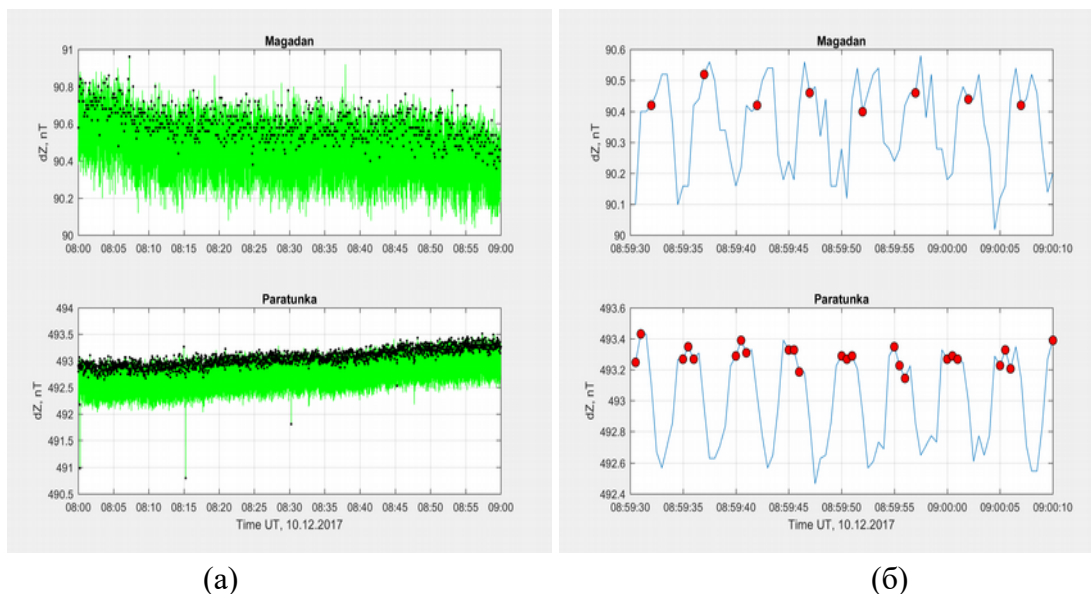


Рис. 21. Пример помехи в записи феррозондового вариационного магнитометра FGE (Z-канал) от работы Оверхаузеровского магнитометра GSM-90. (а) — фрагмент продолжительностью 1 час, черными точками отмечены предполагаемые невозмущенные значения; (б) — фрагмент длительностью 40 с, красными точками отмечены невозмущённые значения. Невозмущенный уровень  $dZ$  в Магадане смещён из-за коррекции ухода таймера, т. е. отсчёт в 08:59:57 по внутреннему неисправленному таймеру был сделан в 08:59:00.

В качестве решения на уровне обработки — использовать только невозмущённые данные FGE. Понятно, что момент времени, к которому привязаны измерения GSM-90, не попадает на помеху. Поэтому отбор данных FGE только в моменты измерений GSM позволяет исключить помеху. Однако объём данных при этом уменьшается в 10 раз, периодичность измерений меняется с 0.5 с на 5 с. В то же время, по кривой первичных значений  $dZ$  видно, что реально на невозмущённый период приходится несколько отсчётов  $dZ$ , т. е. можно увеличить количество используемых данных FGE. В ПО на обсерватории "Паратунка" этот подход реализован - сделана возможность задать количество принятых точек. На рис. 21б, нижняя панель, в дальнейшую обработку приняты 3 значения из 10 в пятисекундном цикле работы GSM-90. Конечно, нарушается однородность ряда, т. к. измерения не являются равномерно распределёнными по времени;

### 1.2.1.8. Базисные значения для вариометра, установленного в XYZ-ориентации

На обсерваториях ИКИР ДВО нет вариационных магнитометров, установленных в ориентации XYZ. Как уже было отмечено, система HDZ является наиболее простой при начальной установке прибора, т. к. не требует дополнительной информации о текущих значениях полного вектора поля. В связи с этим описание обработки данных XYZ-вариометра дадим для магнитометра FGE, используемого на обсерватории "Санкт-Петербург" (SPG), организованной и поддерживаемой ГЦ РАН и Санкт-Петербургским филиалом ИЗМИРАН. Абсолютные наблюдения и вычисление базисных значений на SPG выполняются офсетным методом (offset), который существенно отличается от распространённого обычного нуль-метода (null). Однако, из-за необходимости решения некоторых проблем, на обсерватории были сделаны абсолютные наблюдения нуль-методом, а

обработка результатов была выполнена с помощью программного обеспечения, разработанного автором.

Наблюдения (2 серии) были выполнены 03.12.2017 г., наблюдатель А.Л.Котиков, fDI-магнитометр MinGeo — немагнитный теодолит Theo 010B с феррозондовым датчиком DTU Model-G, абсолютный скалярный магнитометр GSM-19. Пример журнала наблюдений представлен ниже:

**Красное озеро**

число: 2017.12.03  
T° = 10.0

НАБЛЮДАТЕЛЬ: Котиков А.Л.  
FO = -1.9 нТл

Тип измерения	Положение датчика	Время, УТ Ч.М.С.	Полный вектор F, нТ	Отклонение, нТ	Угол (гоны)	Углы магн. Меридиана (гоны)
Мира	A1↑	-----	-----	-----	336.1540	
	B1↓	-----	-----	-----	136.1540	
Склонение	A2 E↑	13:31:19	-----	0.0	128.4576	
(гориз. угол)	A3 W↑	13:32:53	-----	0.0	328.2029	
	B3 E↓	13:35:51	-----	0.0	327.9927	D1=228.2
	B2 W↓	13:37:18	-----	0.0	128.3500	D2= 28.2
Наклонение	B4 N↓	13:47:17	52523	0.0	318.0502	
(верт. угол)	A5 S↑	13:48:54	52523	0.0	118.0520	
	A4 N↑	13:51:59	52523	0.0	81.8510	
	B5 S↓	13:53:30	52523	0.0	281.8540	
Мира	A1↑	-----	-----	-----	336.1540	
	B1↓	-----	-----	-----	136.1541	

Видно, что в отличие от fDI-приборов обсерватории "Паратунка", здесь отсчётная система Theo-010B даётся в градах (гонах), а отсчёты на Миру берутся не в конце D-наблюдения, а по завершении всей серии. Чтобы минимизировать изменения, вносимые в скрипты обработки, исходный файл с результатами наблюдений был оставлен в формате, принятом на обсерватории "Паратунка". Отсчёты в градах набираются в отдельный текстовый файл, конвертируются в систему градусы-минуты-секунды и просто вставляются в файл наблюдений. Наблюдения Миры в конце серии принимаются как выполненные непосредственно после наблюдения склонения.

Ещё одно существенное отличие — на SPG абсолютный скалярный магнитометр GSM-19 не устанавливается на основной столб в абсолютном павильоне, а находится в этом же павильоне, но на постоянном месте. Градиент F между этим местом и основным постаментом определяется эпизодически и на момент наблюдений нуль-методом был принят равным -1.9 нТл. Таким образом, в файле с первичными результатами абсолютных

наблюдений (см. таблицу 2) данные об F отсутствуют.

Для обработки первичных данных (вычисления абсолютных значений D,I) используется скрипт `dif_hms_spg.m`, который работает совершенно аналогично используемому для обсерватории "Паратунка". Вычисление базисных значений выполняется с помощью скрипта `base_calc_fge_spg.m`, при запуске которого в командном окне MATLAB:

- инициализируются исходные параметры с помощью скрипта `\ini_parameters\fge_ini.m`, такие как пути к файлам данных, азимут Миры и т. п. Для примера приведём содержимое этого скрипта

```
% основные инициализационные параметры
global path_all
% добавляем основную рабочую папку для обработки Паратунки
% в конец путей MatLab (зависит от конкретного PC)
path(pathdef) % восстанавливаем пути по умолчанию
% addpath 'D:\Paratunka\FGE_GSM' -end
addpath 'd:\Projects\Saint_Petersburg\fge_gsm' -end

% всем путям предшествует глобальный каталог (зависит от PC)
path_all='d:\Projects\Saint_Petersburg\';

% каталог с данными абсол. наблюдений
path_data_DI=[path_all 'Data\Abs_Data\']; % далее - YYYY\DI_YYYYMMDD.dat

% каталоги с исходными данными FGE и GSM
path_data_fge=[path_all 'data\FGE_GSM\']; % вариометр FGE+GSM
%

% среднегодовые значения поля (по оценкам в октябре 2016 г.)
H_year=14750; Z_year=50328; F_year=52444;
D_year=+(10+11.9/60); I_year=73+40.0/60; % в градусах
% уровни для рисования графиков
FF=52000; HH=14000; ZZ=50000; DD=10; II=73; XX=14000; YY=2000;

% периодичность измерения GSM
dt_gsm=3; % секунд

% принятый азимут Миры
A_astr=dms_deg(287,33,13.8); % из Excel таблицы

% амплитуда единичного выброса в данных GSM (нТ),
% который будет заменен на NaN
dF_spike_lim=5;

% Температурные коэффициенты FGE (H,Z - в нТл/С, D - в град./С)
% Hcorr=Hobs-Kth*(TR-TR0)
KtX=+0.0; KtZ=+0.0; KtD=+0.0/60;
% Температура приведения (нулевой поправки)
TR0=10;
```

- считываются данные FGE и GSM-19. На обсерватории SPG эти данные записаны в текстовый файл формата IAGA2002, фрагмент приводится ниже

Format	IAGA-2002					
Source of Data	GC RAS / IZMIRAN SPb branch					
Station Name	Saint Petersburg					
IAGA CODE	SPG					
Geodetic Latitude	60.542					
Geodetic Longitude	29.716					
Elevation	46					
Reported	XYZF					
Sensor Orientation	XYZF					
Digital Sampling	0.1 seconds					
Data Interval Type	1-second					
Data Type	variation					
# This data file was created using data from the						
# Russian-Ukrainian Geomagnetic Data Center						
...						
DATE	TIME	DOY	SPGX	SPGY	SPGZ	SPGF

2017-12-03	10:31:00.000	337	14516.62	2624.38	50291.03	99999.00
2017-12-03	10:31:01.000	337	14516.64	2624.43	50291.02	52522.73
2017-12-03	10:31:02.000	337	14516.63	2624.38	50291.00	99999.00
2017-12-03	10:31:03.000	337	14516.74	2624.46	50291.11	99999.00
2017-12-03	10:31:04.000	337	14516.71	2624.46	50291.04	52522.75
...						
2017-12-03	11:11:55.000	337	14517.90	2624.05	50292.26	52524.38
2017-12-03	11:11:56.000	337	14517.92	2624.07	50292.27	99999.00
2017-12-03	11:11:57.000	337	14517.90	2624.08	50292.29	99999.00
2017-12-03	11:11:58.000	337	14517.91	2624.13	50292.38	52524.30
2017-12-03	11:11:59.000	337	14517.86	2624.11	50292.35	99999.00

Файл был взят с сайта <http://geomag.gcras.ru/dataproduct-down.html> ГЦ РАН. Для считывания используется функция `iaga2002_read_fun()`;

- как видно по данным F, измерения выполняются через 3 с и не привязаны к началу минуты. Поэтому из полного ряда, в котором при считывании файла значения "99999" заполняются символами NaN, выбираются только значения F с реальными измерениями, чистятся выбросы с помощью функции `remove_spikes()`, описанной в Отступлении II, в данных F учитывается систематическая погрешность (в данном случае принято значение 0 нТл) и редукция (градиент F) для приведения измерения GSM-19 к основному постаменту для абсолютных наблюдений (в данном случае -1.9 нТл);

- выбираются данные dX,dY,dZ,F, которые ближе всего лежат к моментам абсолютных наблюдений, и по ним на моменты наблюдения Da и Ia вычисляются средние значения: dXm(D), dYm(D), dZm(D), Fm(D), dXm(I), dYm(I), dZm(I), Fm(I). Здесь индексы "D" и "I" указывают к моментам времени каких абсолютных наблюдений (склонения или наклонения) относятся средние значения;

- вычисляются средние абсолютные (полные) значения горизонтальной и вертикальной составляющих  $Hm(I) = Fm(I) \times \cos(Ia)$  и  $Hm(I) = Fm(I) \times \sin(Ia)$ ;

- вычисляется базисное значение  $Z0 = Zm(I) - dZm(I)$  и полные значения Z на моменты наблюдения склонения  $Zm(D) = Z0 + dZm(D)$ . При этом предполагается, что Z0 не изменяется за время между D- и I-наблюдениями, что вполне допустимо, т. к. в практике обсерваторий обычно принимается одно базисное значение на сутки, т. е. неявным образом принято, что в течение суток X0, Y0, Z0 постоянны;

- вычисляются полные значения горизонтальной составляющей H на моменты абсолютных измерений склонения  $Hm(D) = \sqrt{Fm(D)^2 - Zm(D)^2}$  и полные значения X- и Y-составляющих  $Xm(D) = Hm(D) \times \sin(Da)$  и  $Ym(D) = Hm(D) \times \cos(Da)$ ;

- далее не составляет труда вычислить базисные

$$X0 = Xm(D) - dXm(D),$$

$$Y0 = Ym(D) - dYm(D).$$

- результаты расчётов выводятся в командное окно MATLAB

```
>> base_calc_fge_spg
Обработка для даты - 03.12.2017
-----
... Считываются данные FGE+GSM (iaga2002) ...
d:\Projects\Saint_Petersburg\data\FGE_GSM\2017\SPG20171203.dat
Приведение данных абсолютного GSM к DI-столбу ... +0.00
Система абсолютного GSM ... +0.00
Используется принятый градиент dFgrad 2016 01 01 -1.90
```

INS	Y0	X0	Z0
1	-28.43	45.41	121.22
1	-28.05	44.65	121.37
1	-28.24	45.0327	121.30
1	0.27	0.5378	0.10

и в виде графиков. Все дальнейшие действия магнитолога-обработчика аналогичны тем, что выполняются для вариометров с HDZ- и fDI-ориентацией.

Необходимо отметить несколько моментов. На обсерватории SPG нулевое положение феррозондового датчика fDI-магнитометра фиксируется в произвольный момент времени, без синхронизации к периодичности вариационных измерений. При частоте вариационных данных меньшей чем 1 Гц, как, например, в данных GSM-19, моменты вариационных измерений могут не совпадать с моментами отсчётов абсолютных измерений. В этом случае приходится либо просто выбирать ближайшее вариационное измерение, либо делать интерполяцию на момент абсолютных измерений. Предполагается, что погрешности, которые возникают при использовании обеих технологиях, не существенны.

Особо необходимо обратить внимание на использование принятого базисного значения F0 вместо реально измеренного непосредственно при абсолютных наблюдениях — см. детали в Отступлении IV.

#### 1.2.1.9. Отступление IV. Проблема оценки базисного значения F0

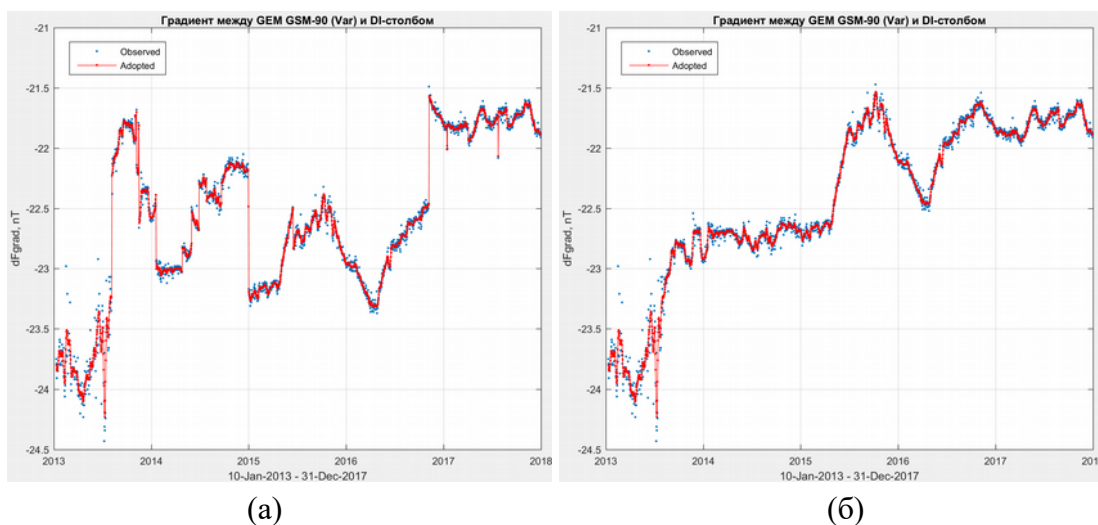
В практике магнитных обсерваторий достаточно распространён подход, когда при абсолютных наблюдениях вместо реального базисного значения F0, непосредственно измеренного вместе с D0, I0, используется некоторое принятое значение, полученное значительное время назад (известны случаи, когда в качестве текущего F0 используется значение, полученное несколько лет назад). Такой подход практикуется, например, если скалярный магнитометр только один, и он установлен не в абсолютном павильоне. В качестве аргументов приводятся возможные проблемы при замене fDI-магнитометра скалярным и обратно, вплоть до физического повреждения, или необходимость тщательного центрирования теодолита fDI-прибора после обратной установки на абсолютный постамент. Также указывается высокая долговременная стабильность базисного значения F0 (практически, пространственного градиента F).

Однако, существует важное обстоятельство. При наличии у обсерватории только одного скалярного магнитометра, который используется как абсолютный и для непрерывной записи, вариометра, например, HDZ, и fDI-магнитометра зачастую контроль достоверности базисных значений выполняется сравнением  $F_v = F(dH+H_0, dZ+Z_0)$  и  $F_a = F_s + F_0$ , которое ожидается близким к нулю. Однако технология получения H0 и Z0 такова, что независимо от достоверности F0, величина deltaF будет близка к нулю. Таким образом, если мы возьмём совершенно произвольное значение F0 и вычислим H0 и Z0, то полученные недостоверные базисные H0, Z0 будут "компенсировать" недостоверные F0. Для описанного выше комплекта аппаратуры при принятом и неконтролируемом F0, возможные реальные изменения F0, например, из-за появления систематической погрешности скалярного магнитометра или изменения магнитной обстановки возле его датчика, приведут к фиктивным изменениям базисных вариационного магнитометра H0, Z0, которые будет невозможно отличить от действительных



(если, конечно, эти изменения не настолько велики или резкие, что их можно заметить непосредственно в непрерывных записях  $F$ ,  $dH$  и  $dZ$ ). Это приведет к тому, что будут получены недостоверные полные значения  $H, Z$  ( $X, Y, Z$ ). Частично признаком проблемы с  $F_0$  будет синхронное поведение  $H_0$  и  $Z_0$  — одновременное увеличение или уменьшение с величиной изменения пропорциональной  $\sin(I)$  и  $\cos(I)$ .

В качестве примера на рис. 22 представлены базисные значения  $F_0$  скалярного магнитометра GSM-90, установленного в вариационном павильоне на обсерватории "Паратунка", в т.ч. на панели (а) показаны исходные значения (наблюденные и принятые), а на панели (б) — с удалёнными скачками  $F_0$ , когда причина и величина скачка были установлены.



**Рис. 22.** Базисные значения  $F_0$  скалярного магнитометра GSM-90 обсерватории "Паратунка". (а) — исходные значения, на которых видны скачки, в т.ч. связанные с техническими проблемами; (б) то же самое, что (а), но скачки были убраны.

Видно, что в целом изменения  $F_0$  за 5 лет не превышают 3 нТл, т.е. очень незначительны. Разброс данных до середины 2013 г. вызван использованием в качестве абсолютного протонного магнитометра ММП-203М2, возможно, с уже устаревшим рабочим веществом. В августе вместо этого прибора начали использовать dIdD GSM-19FD, в режиме измерения только модуля поля  $F$ , без включения дополнительных полей в кольцевой системе. Магнитометр был установлен на полу в абсолютном павильоне и работал в непрерывном режиме. Из-за его громоздкости перестановка на место fDI не выполнялась, поэтому примерно раз в месяц определялся пространственный градиент  $F$  между местом постоянной установки dIdD и абсолютным постаментом, который использовался для приведения его данных к абсолютному постаменту — эти редуцированные  $F$  принимались как абсолютные для получения базисных значений  $F_0$  скалярного магнитометра GSM-90. В конце июня 2015 г. вместо dIdD для получения абсолютных  $F$  начали использовать Оверхаузеровский магнитометр POS-1, в стандартном режиме перестановки на абсолютный столб после завершения DI-наблюдений. Большой скачок  $F_0$  в ноябре 2016 г. является примером "классического" изменения базисного значения  $F_0$  скалярного магнитометра GSM-90, вызванного переносом осветительной лампы в вариационном павильоне, расположенной близко к месту установки GSM-90. Заметный скачок на 0.35 нТл в июле 2017 г. вызван изменением магнитной обстановки на обсерватории после

извлечения обсадной стальной трубы из расположенной на расстоянии 100 м скважины глубиной около 80 м и установкой её обратно через сутки. Данные на панели (б) после исключения известных скачков показывают поведение F0 за 5 лет. Изменения небольшие и частично могут вызваны изменением F в абсолютном павильоне, а не полем в вариационном павильоне.



### 3. Обработка непрерывных магнитных измерений

Основная задача магнитной обсерватории — получение полного вектора магнитной индукции с требуемой частотой и абсолютной погрешностью, обеспечивая соответствие этим требованиям на протяжении длительного времени (годы, десятилетия и более). Компонентные магнитометры (феррозондовые, кварцевые, скалярные с колечной системой), ориентированные на использование на обсерваториях, позволяют выполнять регистрацию вариаций поля с частотой от долей до единиц и десятков Гц с чувствительностью до 0.01-0.1 нТл. При этом современные приборы такого класса могут регистрировать не только вариации, но, практически, полные значения составляющих вектора поля. Конечно, при установке в HDZ-системе, когда Y-составляющая представляет собой вариацию склонения, эти особенности не столь важны. Но они могут быть полезны при установке магнитометра в XYZ-системе. Важно также понимать, что компонентные магнитометры чувствительны к множеству внешних факторов (температура, вращение и наклоны основания, неортогональность датчиков и т. п.) и могут иметь значительные дрейфы из-за аппаратурных особенностей — всё это приводит к необходимости минимизировать эти факторы, их контроля и учёта как на аппаратном уровне, так и при последующей обработке результатов. Для обеспечения долговременной стабильности и абсолютной точности стандартный путь — комбинирование измерений вариационных компонентных магнитометров с абсолютными.

Несколько в стороне стоят скалярные магнитометры, измеряющие модуль поля  $F$  в абсолютном смысле, но выполняющие эти измерения непрерывно. Эти магнитометры в основном достаточно стабильны и не требуют специальных абсолютных измерений для контроля, за исключением необходимости определения пространственных градиентов между скалярным магнитометром и основным постаментом обсерватории, к которому приводятся все магнитные измерения. Появляются также современные компонентные магнитометры, сочетающие в себе принципы вариационных и абсолютных приборов, например, скалярные магнитометры с колечной системой, у которых проекции вектора поля на ось колец могут быть получены в абсолютном приближении.

Таким образом, задача обработки сводится к тому, чтобы по измеренным вариациям (в общем случае) составляющих  $dH$ ,  $dD$ ,  $dZ$  (или  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$ , или  $dD$ ,  $dI$ ,  $F$ , или  $F$ ,  $Z$ ,  $Y$  и т. д.) и соответствующим базисным значениям  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$  (или других), а также по непрерывным измерениям модуля поля  $F$  и базисным значениям  $F_0$  (градиенту) вычислить полные значения вектора с требуемой частотой. В эпоху аналоговых записей вариаций на фотобумагу итоговые данные получали с периодичностью 1 час, в настоящее время стандартами INTERMAGNET определена периодичность 1 мин и внедряется новый стандарт для итоговых данных с частотой 1 Гц. Соответственно, должны соблюдаться требования по способу усреднения (фильтрации), форматам выходных данных, их оперативности и т. п.

Стандартом INTERMAGNET определены несколько типов данных, различающихся требованиями по качеству и оперативности предоставления. Минутные данные, вычисленные по первичным результатам измерений без использования базисных значений имеют статус Reported (или Variation для формата IAGA2002). Основное требование к ним — оперативность передачи (в течение трёх суток). Данные следующего уровня имеют статус Adjusted (или Provisional для формата IAGA2002), т. е. минутные значения получены по первичным данным после удаления помех, заполнения пропусков и учёта принятых на данный момент базисных значений. Оперативность передачи в INTERMAGNET — 7 сут. Таким образом, данные в статусе Adjusted имеют смысл полных составляющих, однако

требования по качеству базисных значений невысокие — это могут быть постоянные значения, принятые на весь год. Следующий уровень — это квази-окончательные данные, статус Quasi-definitive. Они отличаются от Adjusted тем, что требования к качеству используемых базисных значений достаточно высокие — они должны быть близки к тем, которые ожидаются при подготовке итоговых годовых (Definitive) данных. Оперативность передачи — недели/месяц. И последний уровень минутных данных — окончательные, годовые, статус — Definitive. Эти данные готовятся по завершению года, обычно к середине следующего года, с большой тщательностью и аккуратностью, и проходят трёхступенчатый контроль — обсерваторией, со стороны специально выделенных от INTERMAGNET проверяющих и затем руководителем подкомитета OPSCOM INTERMAGNET по окончательным данным.

### **3.1. Обработка измерений на примере феррозондового HDZ-вариометра FGE**

На обсерватории "Паратунка" установлены три феррозондовых компонентных магнитометра — FGE-DTU (Дания) и японские FRG-601 и MAGDAS. Технологии обработки результатов измерений этими магнитометрами достаточно близки, но поскольку FGE является основным прибором, данные которого используются для подготовки информации для INTERMAGNET, то весь цикл обработки покажем на его примере. Отметим также, что во всех случаях речь идёт о подготовке минутных данных.

Логика обработки магнитных данных предполагает как минимум три этапа:

- 1) общая оценка данных за сутки, идентификация помех и сбоев и их удаление, сравнение первичных данных разных магнитометров, сопоставление с сопутствующей информацией — данными о температуре, данными о работах на обсерватории и др.;
- 2) вычисление минутных значений полного вектора поля, вывод в файлы в требуемых форматах, контроль этих файлов, заполнение пропусков данными, полученными другими магнитометрами. Подготовка информации (графической и текстовой) для других пользователей и для сайта обсерватории;
- 3) отправка данных в GIN INTERMAGNET, контроль данных обсерватории на сайте INTERMAGNET.

#### **3.1.1. Общая оценка первичных данных за сутки**

Оценка первичных данных магнитометров FGE и GSM-90 выполняется с помощью скрипта **fge\_process.m** и включает следующие этапы:

- 1) инициализация постоянных с помощью скрипта `\ini_parameters\fge_ini.m`, в т.ч. временное добавление в список путей MATLAB папки текущей обработки, определение путей к файлам данных FGE, GSM-90, задание частоты измерений FGE и GSM-90, постоянных, которые вычитаются из полных значений составляющих поля для лучшего масштабирования при рисовании графиков, температурные коэффициенты FGE и др.;
- 2) на запрос вводится дата, для которой выполняется обработка. По умолчанию предлагается дата, на одни сутки раньше, чем текущая. Если дата уже вводилась, то она используется как значение по умолчанию:

```

>> fge_process
Введите дату DD.ММ.YYYY [<Enter>, если 07.01.2018 или 1, если след. сутки] ...
24.11.2017
----- 24-Nov-2017
... Считываются данные GSM ... d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017\f2017328.pe0
... Считываются данные FGE, все данные ...
d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\fge\2017\v2017328.pe0
... Считываются данные FGE, точек 3 ...
d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\fge\2017\v2017328.pe0
!!! ... Выполняется отбор данных FGE для заданных моментов ...
... Текущий градиент dFgrad = -21.71
... Чистка помех при зондировании ионосферы ...
... Чистка помех при зондировании ионосферы ...
... Учитывается зависимость  $Z=f(dH, dD)$  ...
Текущие базисные ... +21775.64 нТ, -286.8895', +46833.47 нТ (за 24-Nov-2017)

```

3) считываются данные скалярного магнитометра GSM-90 из файла с полным именем вида `\data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017\f2017328.pe0` (здесь "328" — порядковый номер дня в году). Используется функция `scalar_gsm_read_fun()`, входными параметрами для которой являются имя файла и периодичность измерений магнитометром в секундах. Поскольку данные хранятся в бинарном виде, используются встроенные функции низкоуровневого чтения файла и бинарные преобразования. Отсутствующие данные, которые в файле кодируются как "0", заполняются символом NaN. На выходе формируется два вектора - сериальная дата Tf и значение модуля F;

4) считываются данные компонентного магнитометра FGE из файла с полным именем вида `\data\FGE_GSM\momwe\fge\2017\v2017328.pe0`. Используется функция `var_fge_read_fun()`, входным параметром которой является имя файла с полным путём, на выходе формируются векторы сериальной даты Tv, вариаций dH, dD, dZ (в нТл), сериальной даты температуры Ttr и значения температуры TR (в °C), температура измеряется раз в минуту. Файл с первичными данными FGE также является бинарным, поэтому используется низкоуровневое считывание и бинарные функции MATLAB. Для преобразования данных из внутреннего бинарного формата в физические единицы используются аппаратные параметры, такие как коэффициенты преобразования АЦП для трёх магнитных и температурного каналов, параметры неортогональности и др. (все данные предоставлены разработчиком и считываются в память с помощью функции `fge_adc_coeff()`). Пропуски заполняются символом NaN и в командном окне MATLAB выводится сообщение о пропущенных данных (указывается начало и конец каждого непрерывного интервала отсутствующих измерений). В данных FGE на обсерватории "Паратунка" проявляются помехи в виде прямоугольного меандра с амплитудой до 1 нТл, возникающие во время поляризации Оверхаузеровского скалярного магнитометра GSM-90. Из-за этого только часть отсчётов FGE (при частоте исходных измерений 2 Гц), не попадающие в этот интервал, могут рассматриваться как невозмущённые. При вызове функции `var_fge_read_fun()` задаётся набор моментов времени, для которых результаты измерения FGE будут приняты. Подробности приводятся в Отступлении III (в главе 2);

5) корректируются метки времени в первичных данных. Подробно эта процедура описана в разделе вычисления базисных значений магнитометра FGE (2.1.2.4);

6) запускается функция `remove_errors()` удаления задокументированных помех в элементах dH, dD, dZ, F (или фрагментов данных, которые требуется удалить по той или иной причине) — если в обрабатываемых сутках такие помехи имеются. Этот этап достаточно важный, поэтому он отдельно рассмотрен в Отступлении V;

7) запускается функция **remove\_spikes()** удаления единичных изолированных выбросов в  $F$ , превышающих (по амплитуде) заданный порог (см. Отступление II в главе 2);

8) запускается функция **remove\_radio\_noise\_fun()** удаления помехи от ионозондов. Вопрос об этих помехах подробно рассмотрен в Отступлении VI;

9) учитывается зависимость вариаций вертикальной составляющей от H- и D-вариаций;

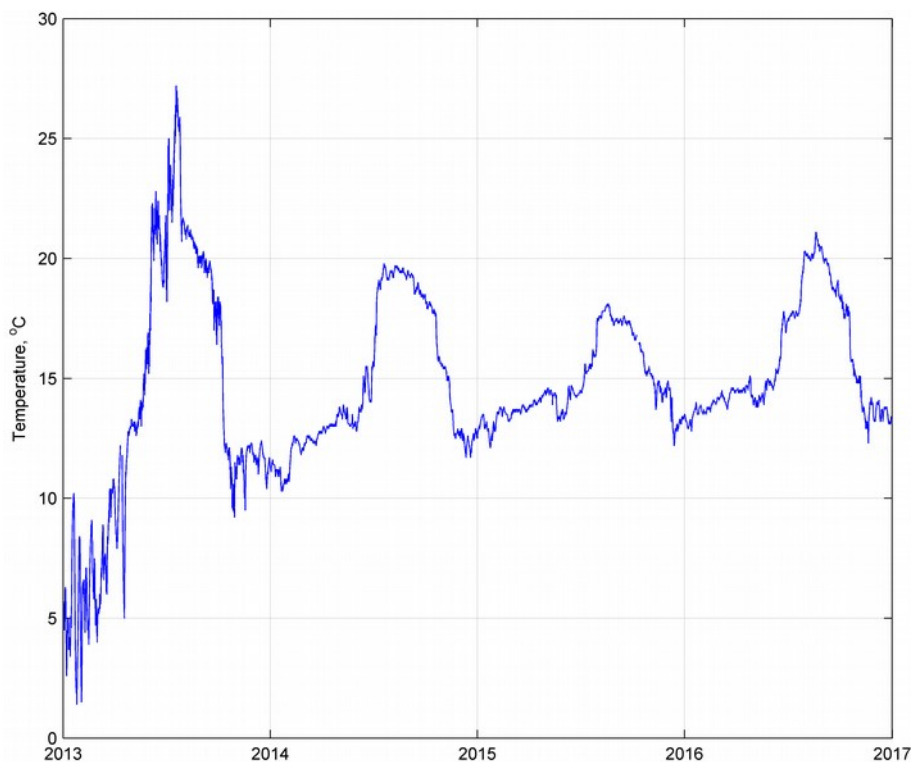
10) из файлов **baseline\_current\_fge.dat** и **dFgrad\_current\_fge.dat** в папке `\ini_parameters\` считываются базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ ,  $F_0$  на текущие сутки. При отсутствии в файлах информации для суток, которые обрабатываются, выбираются ближайшие, но более ранние базисные значения. Затем вычисляются полные значения вектора поля и его модуля

$$\begin{aligned}H &= \sqrt{((H_0 + dH)^2 + dD^2)}, \\D &= D_0 + \text{atan}(dD/H), \\Z &= Z_0 + dZ, \\F_s &= F + F_0,\end{aligned}$$

и модуль  $F_v = \sqrt{H^2 + Z^2}$ . Полученные данные записываются в файлы в формате MATLAB, удобном для быстрого считывания, т. к. форматное считывание текстовых файлов в общем случае достаточно медленное. Необходимость в таком считывании возникает, если необходимо быстро собрать данные за несколько суток, например, за неделю, месяц или больше. Пример такой быстрой сборки — минутные данные о температуре за пять лет, регистрируемой системой Magdalog, см. рис. 23;

11) данные выводятся в графическом виде (см. пример на рис. 24). Большое количество графиков вызвано тем, что один из принципов, закладываемых в описываемое ПО — максимальная визуализация данных, ориентированная на активную работу магнитолога при просмотре результатов измерений. Графическая система MATLAB (и Octave) хорошо развита и предоставляет большой набор возможностей для работы: маркировка кривых цветом, типом линий и символами, масштабирование (выделение требуемых участков графиков с помощью манипулятора "мышь"), снятие координат кривой с помощью графического курсора и др. Отметим особенности и задачи каждого графика (окна типа Figure в системе MATLAB):

- Figure 1 (рис. 24а) показывает два типа данных для каждой составляющей  $dH$ ,  $dD$ ,  $dZ$  — исходные данные, полученные с частотой 2 Гц (синяя кривая), и отобранные, которые не содержат помеху от GSM-90 (по три измерения FGE в одном цикле измерений GSM-90, красная кривая, см. Отступление III). Фрагмент графика показан на рис. 25. Здесь видно, что отобранные данные  $dZ$  не совпадают с невозмущенными уровнями по ординате — это связано с тем, в  $dZ$  введена поправка, учитывающая зависимость  $dZ$  от вариаций горизонтальных составляющих. Около 05:00:18 в данных  $dD$  и  $dZ$  виден пропуск — результат удаления помехи от ионозонда "Парус". Рисование кривых  $dH$ ,  $dD$ ,  $dZ$  в отдельных панелях позволяет эффективно использовать средства масштабирования, независимо увеличивая каждую из кривых;



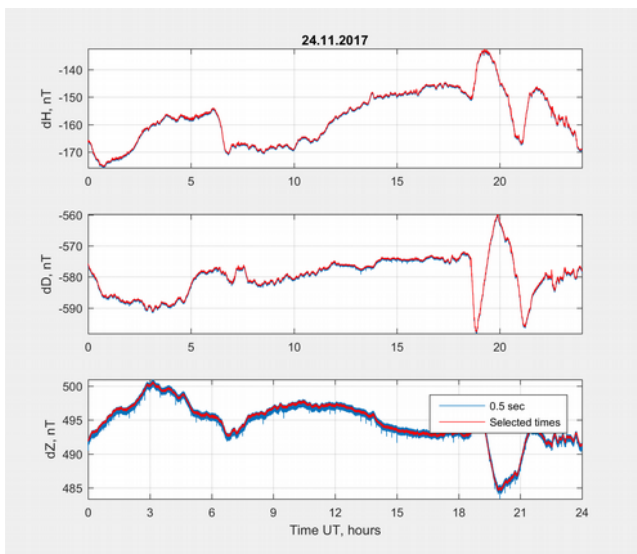
**Рис. 23.** Температура в вариационном павильоне (минутные значения, полученные цифровым термодатчиком, вмонтированным в регистратор Magdalog магнитометров FGE и GSM-90). В конце ноября 2013 г. вариационный павильон был отремонтирован, что значительно улучшило его термоизоляцию. Как следствие, температурный режим внутри павильона стал более стабильным без изменения количества обогревателей (в павильоне установлен один нагреватель с терморегулятором и один в качестве фоновый в зимнее время). Сезонные вариации температуры вызваны как естественным ходом уличной температуры, так и искусственным понижением порогового уровня регулировки зимой и повышением в летнее время.

- Figure 2 (рис. 24в) подобна предыдущей, однако здесь все три кривых собраны на одном графике, что обеспечивает одинаковый масштаб и его синхронное изменение — это удобно при сравнении амплитуд или временных особенностей вариаций и аномалий. Кроме того, на этом графике зелёными маркерами показаны все первичные данные, которые были удалены в процессе обработки. Также тут треугольниками "▽" и "△" отмечены моменты астрономических закатов и восходов Солнца, т. е. маркируется дневное и ночное время — это иногда полезно знать при анализе помех техногенного характера. На фрагменте (см. рис. 26) суточного графика более детально видно маркировку удалённых значений;

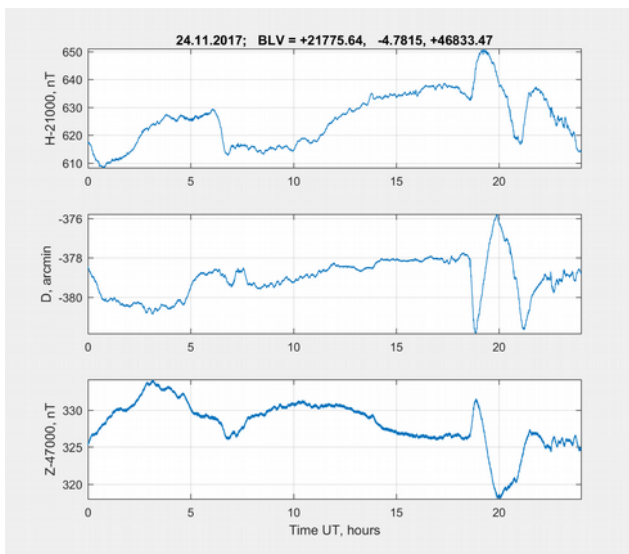
- Figure 3 (рис. 24б) в значительной степени повторяет рис. 24а, но здесь показаны полные значения составляющих вектора поля, а склонение  $D$  представлено в угл.мин., что во многих случаях необходимо при сравнении с данными других магнитометров, например, с результатами измерений  $dIdD$ ;

- Figure 4 (рис. 24г) сравнивает вариации модулей поля:  $F(GSM)$ , непосредственно измеренных с помощью скалярного магнитометра GSM-90, и  $F(FGE)$ , вычисленных по вариациям  $dH$  и  $dZ$  и соответствующим базисных значениям  $H_0$ ,  $Z_0$ , принятым на день обработки. График полезен тем, что на нём можно более эффективно идентифицировать помехи, зарегистрированные двумя практически независимыми и разнотипными приборами, которые работают на различных физических принципах. При этом на графике данные FGE представлены с частотой 2 Гц или выбранные при минимизации помех от GSM-90, а данные

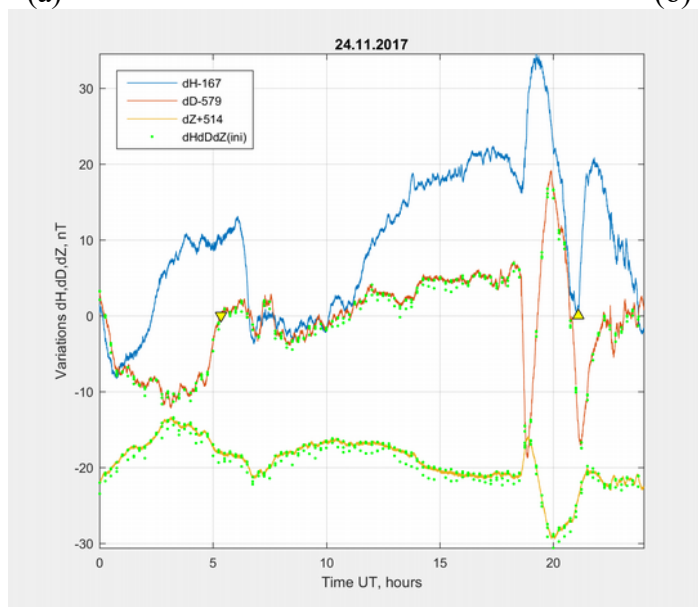
GSM-90 – с частотой 0.2 Гц;



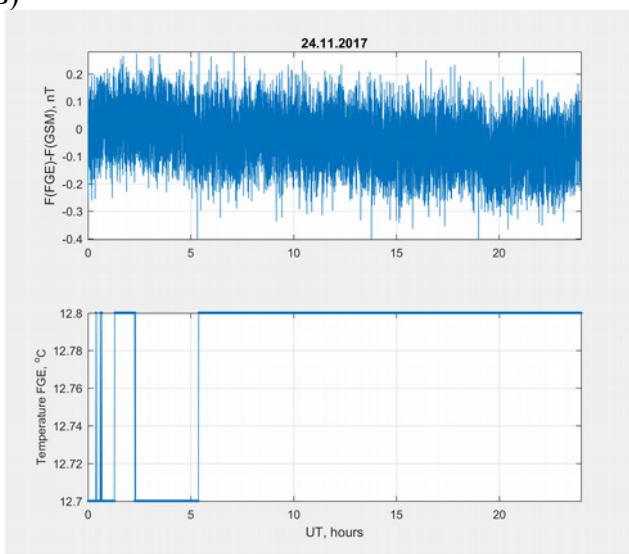
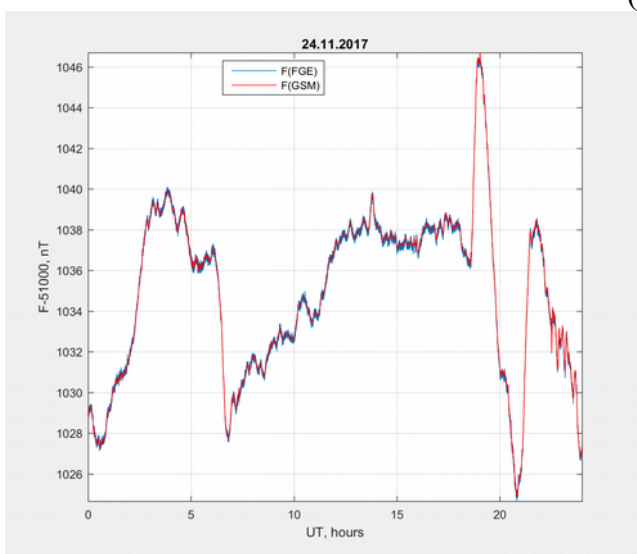
(a)



(б)



(B)



(г)

(д)

Рис. 24. Примеры вывода текущих данных магнитометров FGE и GSM-90, обсерватория "Паратунка". (а) — вариации  $dH$ ,  $dD$ ,  $dZ$  в нТл (исходные данные с частотой измерений 2 Гц и выбранные значения, не возмущённые наводкой от GSM-90); (б) — вариации полных значений, после учёта базисных  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ , значения представлены в заголовке графика; (в) — вариации  $dH$ ,  $dD$ ,  $dZ$  (свободные от наводки от GSM-90), сведённые в одну панель графика. Здесь же маркерами показаны удалённые значения; (г) — значения  $F_v=F(\text{FGE})$  и  $F_s=F(\text{GSM})$ ; (в) — разность 5-секундных значений  $F(\text{FGE})$ , совпадающие по времени с моментами  $F(\text{GSM-90})$  скалярного магнитометра (верхняя панель) и минутные показания термоматчика, расположенного в регистраторе Magdalog (нижняя панель).

- Figure 5 (рис. 24д) на верхней панели представляет разности модулей  $F(\text{FGE})$  и  $F(\text{GSM})$ , для FGE взяты только данные, полученные в моменты измерений GSM-90. На нижней панели показаны минутные данные о температуре, термоматчик установлен в регистраторе Magdalog. График  $\Delta F = F(\text{FGE}) - F(\text{GSM})$  обычно является стартовым при анализе первичных данных, т. к. на нём достаточно эффективно выявляются проблемные места в измерениях, например, помехи от различных источников с амплитудой на уровне 0.3 нТл и более. По отклонению кривой  $\Delta F$  от нулевого уровня магнитолог оценивает корректность принятых при обработке базисных значений  $H_0$ ,  $Z_0$ ,  $F_0$ . Кроме того, сопоставление  $\Delta F$  и температуры позволяет делать некоторые суждения о температурных эффектах, т. к. феррозондовый FGE имеет температурные зависимости на уровне 0.5 нТл/°C, т. е. изменения температуры за сутки на 0.5°C могут проявиться в виде вариаций  $\Delta F$  на уровне 0.2-0.3 нТл.

Задача магнитолога на этапе первичного анализа результатов магнитных измерений за сутки - оценить качество данных и выполнить соответствующие правки. На этом этапе заполняются файлы с параметрами помех от ионозонда **Radio\_Sessions.dat** и с интервалами удаления некачественных данных **Remove\_FGE\_HDZ\_2017.dat** и **Remove\_GSM.dat**, возможно, пересчитываются или корректируются вручную принятые базисные значения (файлы **baseline\_current\_fge.dat** и **dFgrad\_current\_fge.dat**). После внесения дополнений или изменений снова запускается скрипт **fge\_process.m** и оцениваются эффект от сделанных изменений.

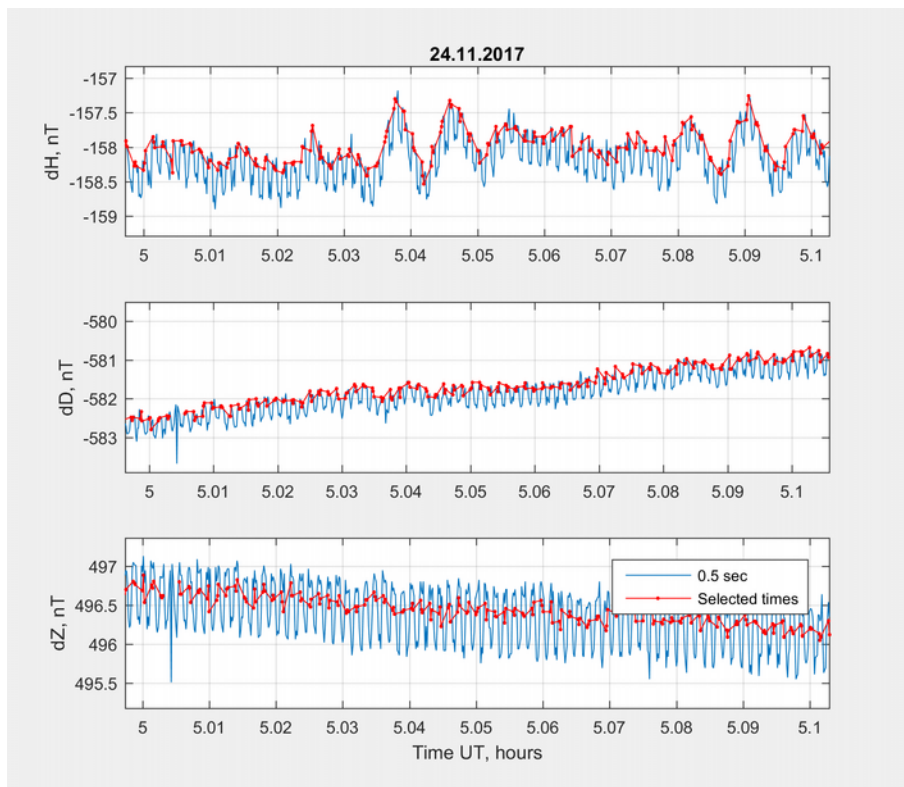


Рис. 25. Фрагмент рис. 24а, вариации dH, dD, dZ.

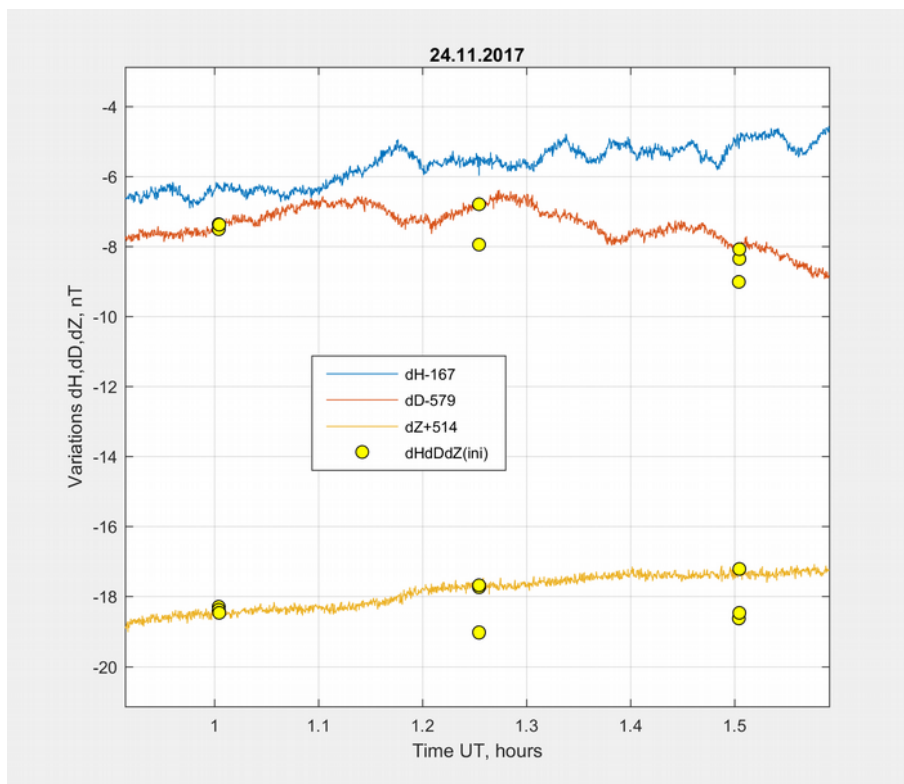


Рис. 26. Фрагмент записи рис. 24в, маркером "o" показаны удаленные значения, включающие помехи от ионозонда.

Важнейшей обязанностью магнитолога-обработчика является заполнение электронного



журнала обработки, который ведётся практически для каждого самостоятельного комплекса магнитометров, например, FGE+GSM90, dIdD+POS1 и т.п. Пример записи об обработке за 24 ноября 2017 г. показан ниже:

=====  
25.12.2017LT

Обработка данных за 24.12.2017 (Бабаханова, Хомутов - 10:12 26.12.2017)

Текущие базисные ... +21775.87 нТ, -286.5171', +46833.33 нТ (за 24-Дец-2017)  
Текущий градиент dFgrad = -21.85

- 1) температура за сутки повысилась с +12.6С до +12.7С
- 2) все сутки в D, Z видны помехи от ионозонда "Парус", в dF до -1.7 нТл - удалены в D, Z с помощью Radio\_session
- 3) с начала суток видны помехи от японского ионозонда, в dF до -0.6 нТл - удалены с помощью Radio\_session
- 4) землетрясение в 00:15:42.5, широта 49.8992, долгота 156.3447, 385 км к юго-востоку от П-К, глубина 99 км, Ks=12.1, MS20=5.3 - размах в D и в Z до 1 нТл - не удаляла

		K - index: K9-limit = 450nT										
time UT		0	3	6	9	12	15	18	21	24		
23-DEC-17	357	1	0	1	2	1	0	1	1	1	7	
24-DEC-17	358	1	2	2	3	3	4	1	2	18		

В журнале фиксируются дата обработки, дата измерений, результаты которых обрабатываются, фамилия основного обработчика и вносящего существенные дополнения, стандартная информация о принятых базисных значениях, специфическая информация об особенностях данных, удалениях, чистках, нестандартных событиях, оказавших влияние на измерения, о событиях на обсерватории, о результатах сравнения с данными других магнитометров (после соответствующей обработки) и др. Журнал имеет некоторую устоявшуюся структуру записей, хотя заполняется он в достаточно свободном стиле. Как показывает опыт обработки цифровых архивных данных, полнота информации об условиях и особенностях измерений и результатов и принятых при обработке действиях - чрезвычайно важный фактор для принятия обоснованных и правильных решений по данным, получаемым и передаваемым внешним пользователям.

### 3.1.2. Отступление V. Удаление документированных помех

Выделение помех в данных, прежде всего — в первичных, и их удаление является одной из важных задач обсерватории. Вопрос невероятно обширен и интересен и вряд ли здесь необходимо (и возможно) рассматривать его подробно. Будем считать, что магнитолог смог идентифицировать помеху, например, по характерным её признакам, по величине, по дополнительной информации о ситуации на обсерватории, сравнением с данными другого магнитометра и т. п. Идентифицировать — как минимум определить начало и конец фрагмента ряда данных, который содержит помеху. Важно также установить другие количественные характеристики (амплитуду, форму и т.п.) и причину.

Один из базовых принципов, заложенный в рассматриваемое программное обеспечение — это то, что практически всегда получение данных любого статуса (Reported, Quasi-definitive или Definitive) начинается с чтения файла с первичными результатами измерений. Все последующие преобразования выполняются в процессе обработки этих первичных данных в памяти компьютера, файлы с результатами промежуточных вычислений не создаются (за некоторыми исключениями). Какие именно преобразования требуется выполнить определено в скрипте, обычно отдельными функциями. Параметры, описывающие

количественные характеристики этих преобразований, содержатся в специальных файлах. В принципе, получение полных составляющих поля по базисным и вариациям можно рассматривать как такое промежуточное преобразование, параметры которого (базисные значения) обычно хранятся в отдельном файле.

Поэтому процедура удаления помех реализована по этому же принципу — как одно из промежуточных преобразований, применяемых к исходным (первичным) данным в процессе работы скрипта. Параметры, которые описывают удаляемый фрагмент, записываются в обычные текстовые файлы **Remove\_FGE\_HDZ\_2017.dat** и **Remove\_GSM.dat** в папке `\ini_parameters\`, для FGE и GSM-90, соответственно. Файлы являются пополняемыми, легко читаемыми и редактируемыми. Пример записей в этих файлах представлен ниже

```
%YY MM DD UT1 UT2 HDZ
2017 12 22 14.7464 14.8077 010 % землетр.
2017 12 22 14.7470 14.7849 100 % - " -
2017 12 22 14.7521 14.7640 001 % - " -
2017 12 22 15.6234 15.6303 010 % землетр.
2017 12 22 22.4095 22.5182 010 % землетр.
2017 12 22 22.4872 22.4931 100 % - " -
2017 12 23 21.0055 21.0056 011 % от ионозонда
2017 12 26 03.2544 03.2564 011 % от ионозонда
2017 12 26 03.6527 03.6551 111 % выброс
```

```
% Date UT1 UT2
2017 11 03 01.4521 01.7168 % работа с терморегулятором
2017 11 26 20.5978 20.6061 % лопата у входн. двери
2017 12 12 13.3512 13.3547 % есть во многих приборах
2017 12 12 14.8252 14.8295 % - " -
```

Здесь YY,MM,DD – год, месяц и число, UT1 и UT2 – границы фрагмента ряда данных, который требуется удалить. В файлах для компонентных магнитометров введена колонка "HDZ" с флагами для указания, в какой именно составляющей будет удаление (0 — не удалять, 1 — удалять), т. е. запись "011" указывает, что требуется удалить данные в компонентах D и Z. Также практикуется давать краткий комментарий к записям в этих файлах, указывающих причину удаления.

При выполнении обработки на определённом этапе вызывается функция, которая просматривает файлы с информацией об удалении данных. При нахождении записи с датой, совпадающей с датой обрабатываемых данных, в соответствующей составляющей и в соответствующем интервале времени реальные значения будут заменены на символ NaN. В качестве примера на рис. 27 показаны результаты удаления помехи от землетрясения 22.12.2017 г. в данных магнитометра FGE (с датчиками на карданном подвесе). Параметры удаляемых интервалов приведены выше (раздельно для каждой составляющей, т. к. эффект землетрясения проявляется неодинаково — наиболее сильно в D, менее всего — в Z).

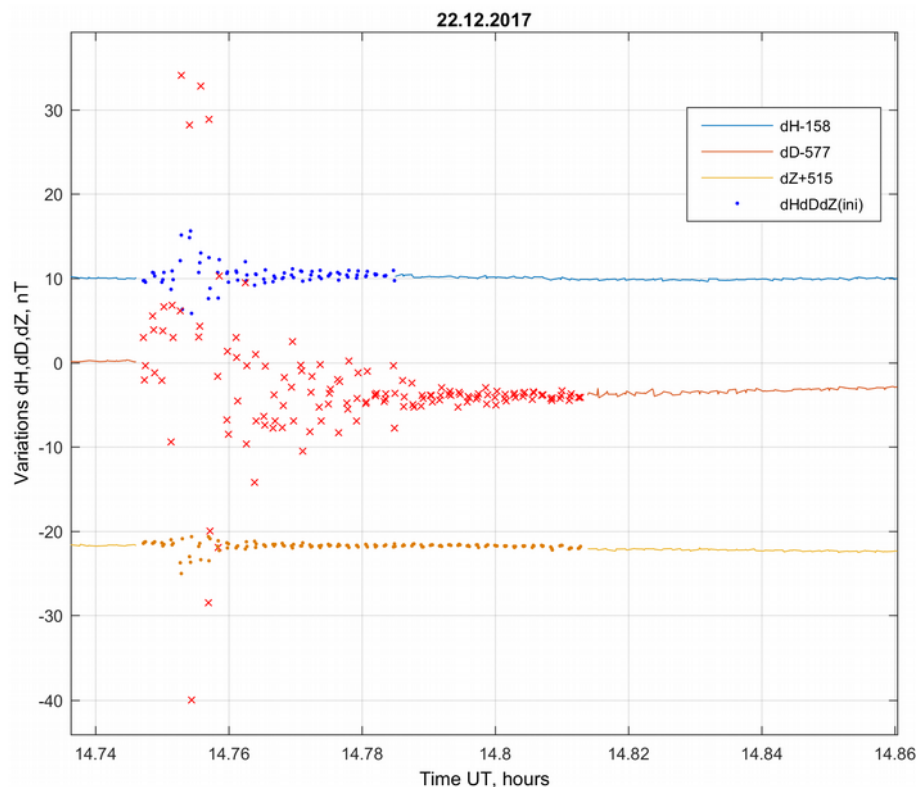
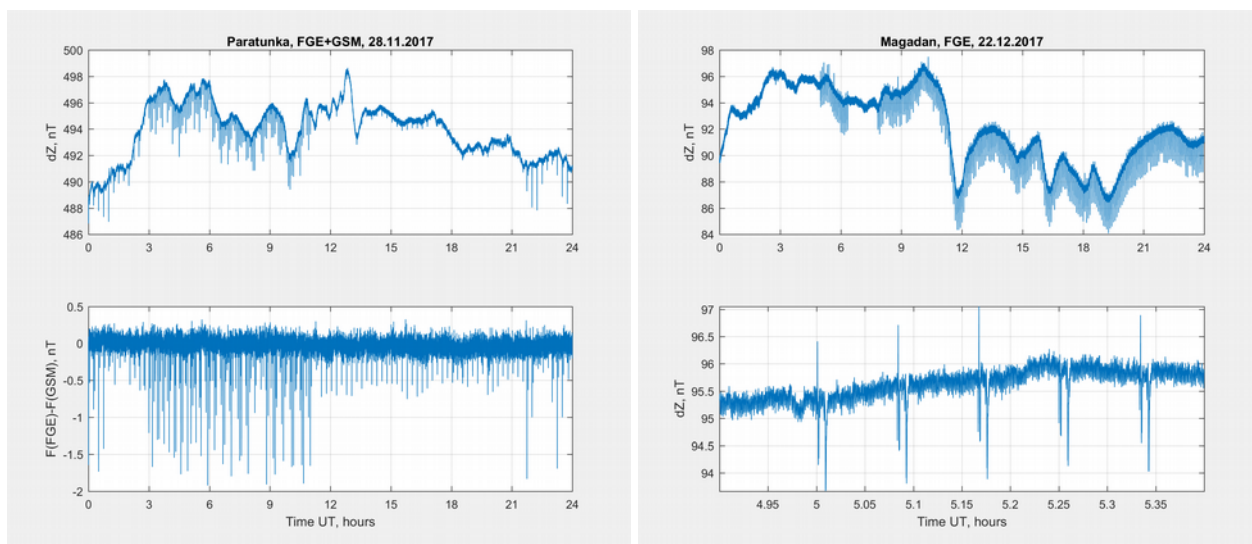


Рис. 27. Пример удаления в данных магнитометра FGE (с блоком датчиков на карданном подвесе) фиктивных колебаний магнитного поля, возникающих при землетрясении. Реальные данные, показанные на кривых маркерами "." и "x", при обработке заменены на символ NaN.

### 3.1.3. Отступление VI. Удаление помех от ионозонда

Помехи от ионозонда — специфический, но достаточно распространённый вид помех в магнитных данных, которые могут возникать, если магнитная обсерватория расположена вблизи ионосферной станции (по опыту — на расстоянии от излучающей антенны на первых сотнях метров). Предположительно эти помехи вызваны влиянием на электронику феррозондовых датчиков излучения на определённых частотах из общего диапазона пробега частот 1-15 МГц при зондировании ионосферы (вертикального или наклонного). Однако, не все модели феррозондовых магнитометров подвержены влиянию радиоизлучения ионозондов. На обсерваториях "Паратунка" и "Магадан" проблема существует только у магнитометра FGE, в то время как записи японских приборов MAGDAS и FRG-601 остаются чистыми. Примеры такой помехи в данных FGE на обсерваториях "Паратунка" и "Магадан" представлены на рис. 28.



(a)

(б)

**Рис. 28.** Примеры помех от ионозондов в результатах измерений феррозондовым магнитометром FGE. (а) — на обсерватории "Паратунка", верхняя панель — вертикальная составляющая  $dZ$ , нижняя панель — разность модулей  $F$ , вычисленных для FGE и непосредственно измеренных с помощью GSM-90; (б) — на обсерватории "Магадан", верхняя панель — вертикальная составляющая  $dZ$ , нижняя панель — фрагмент записи, показывающий структуру помехи.

На обсерватории "Паратунка" работают два ионозонда для вертикального зондирования: (1) ионозонд "Парус" (ИЗМИРАН, Москва), с излучающей антенной типа "двойной вертикальный ромб", расположенной на расстоянии около 215 м от магнитометра, и (2) FM-CW (Frequency Modulated Continuous Wave) радар (университет Кюсю, Япония) с антенной типа "дельта" на расстоянии около 160 м от магнитных павильонов, работающий преимущественно в доплеровском режиме, но также получающий стандартные ионограммы. Зондирование в штатном режиме выполняется каждые 15 мин с привязкой к UTC по GPS-приёмнику, при этом время работы радара сдвинуто на 3 мин относительно сеансов ионозонда "Парус". 28.11.2017 г. с 03UT ионозонд был переведён в режим зондирования через 5 мин, после 10UT произошла его аварийная остановка. Помехи при зондировании наиболее заметно проявляются в вертикальной составляющей (до -2 нТл от ионозонда "Парус" и до -0.7 нТл от радара) и практически не видны в Н-компоненте.

Помеха в данных FGE на обсерватории "Магадан" является следствием работы ЛЧМ-радар для наклонного зондирования ионосферы (приемный комплекс расположен в Иркутске). На рис. 28б показана запись магнитных вариаций  $dZ$  за сутки, когда работа радара была возобновлена после перерыва. Периодичность сеансов зондирования — 5 мин. Как видно по фрагменту записи на нижней панели рис. 28б помеха имеет сложную двухмодовую структуру, в отличие от помех на обсерватории "Паратунка", и амплитуду до -1.5 нТл.

Важнейшим обстоятельством, имеющим отношение к обсуждаемому вопросу, является высокая временная стабильность работы ионозондов — начала сеансов синхронизируется с UTC по GPS-сигналам. В случае, если параметры зондирования (начальная и конечная частоты и шаг, мощность и др.) не меняются, то положение и структура радиопомехи в магнитных данных практически не

изменяется со временем. Это обстоятельство используется для её удаления с помощью простого алгоритма — создаётся маска из "0" и "1" с частотой магнитных измерений, в которой "0" соответствуют измерению с помехой. Параметры генерации маски заносятся в специальные текстовые файлы `\ini_parameters\Radio_Sessions.dat`, пример записи представлен ниже

```
% Date      UT1      Date      UT2      Step dt1  dt2
2017 11 09 00 00 00 2017 11 13 23 59 59 15 +213 +231 % Японский ионозонд
2017 11 21 03 00 00 2017 11 22 23 59 59 15 +213 +231 % - " -
2017 11 27 09 00 00 2017 11 29 23 59 59 15 +213 +231 % - " -
2017 11 28 00 00 00 2017 11 28 23 59 59 05 +013 +018 % Парус, интенсивный режим
2017 11 29 00 00 00 2017 12 16 23 59 59 15 +013 +018
```

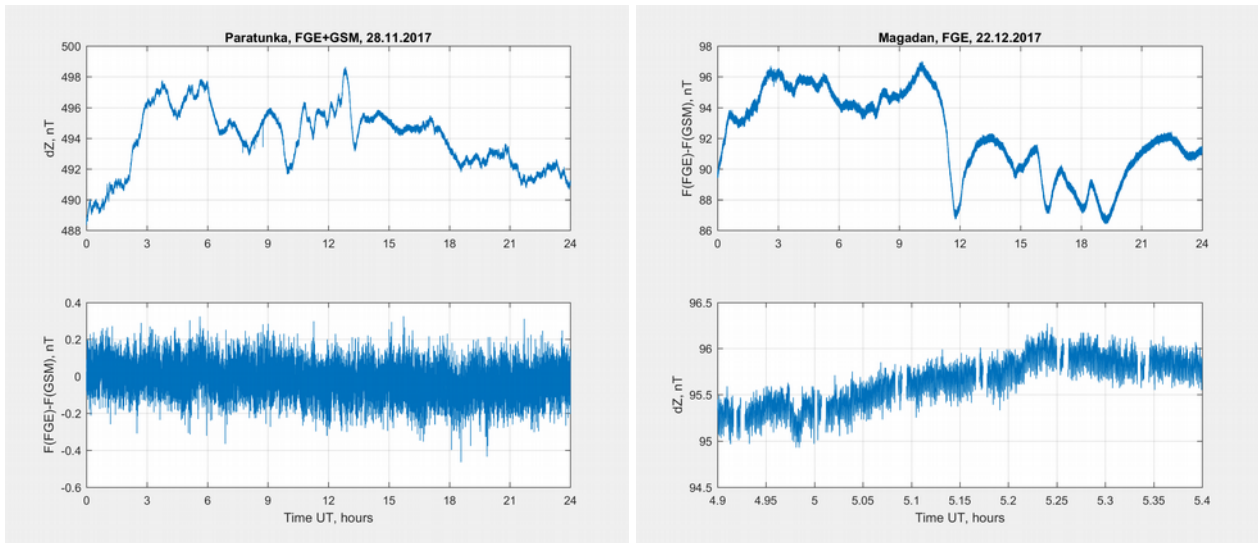
Здесь Date, UT1 и UT2 – дата и время начала и конца работы ионозонда, Step – периодичность сеансов ионозонда (в мин), dt1 и dt2 – начало и конец интервала с помехой относительно начала сеанса, т. е. "05 +013 +018" означает, что помеха проявляется каждые 5 минут в интервале, например, 09:35:13- 09:35:18UT.

При работе основного скрипта при суточной обработке магнитных данных вызывается функция `remove_radio_noise_fun()`, которая по параметрам зондирования формирует маску и заполняет символами NaN все данные, соответствующие "0" в маске. На рис. 29 показаны результаты удаления помех. Ограничение функции — она предполагает чистку помех для полных суток, поэтому если по какой-то причине ионозонд работал только ограниченное время, то более оптимально будет удалить это небольшое количество помех вручную, заполняя файл `Remove_FGE_HDZ_2018.dat` и используя функцию `remove_errors()`.

Ещё раз подчеркнём, что основная особенность, которая используется при удалении помех в магнитных данных, возникающих при зондировании ионосферы — стабильность положения этих помех по времени и сохранения их структуры. Конечно, при смене режима работы ионозонда временное положение помехи может измениться — в этом случае вводятся новые параметры в файл `Radio_Sessions.dat`.

Второй важный момент — потеря данных, которая возникает при такой чистке. Возникающие пропуски становятся актуальными при использовании секундных данных, поскольку во многих случаях при анализе этих данных используемые алгоритмы требуют полных рядов и исследователь вынужден заполнять пропуски. Однако, на наш взгляд, заполнение этих пропусков даже с помощью обычной линейной интерполяции будет давать более приемлемую и достоверную входную информацию для научного анализа, чем информация с регулярными выбросами амплитудой в несколько нТл. В отношении получения минутных значений вопрос также актуальный, т. к. INTERMAGNET рекомендует использовать код "99999" при пропусках более 10% в интервале, по которому вычисляются минутные значения. В приведенных выше примерах чистка данных обсерватории "Магадан" приводит к потере 30% и 17% исходных значений каждую пятую и пятую+1 минуту, соответственно. Таким образом, формально требуется заполнить каждые два минутных значения из пяти символом "99999". Для обсерватории "Паратунка" при стандартном режиме работы обоих ионозондов потери для четырёх последовательных минут составляют 5, 5, 13 и 22%, т. е. должны быть отбракованы две минуты из пятнадцати. Проблема сводится к сравнению

достоверности минутных значений, полученных по неполным исходным данным, и минутных значений, которые будут получены исследователем при заполнении этих пропущенных минутных значений с помощью того или иного метода.



(а)

(б)

Рис. 29. Аналогично рис. 28, но помехи от работы ионозондов удалены.

Ещё один момент, который не должен быть упущен — все помехи (для выбранной составляющей) имеют несимметричный вид, т. е. они лежат либо ниже невозмущённого уровня, либо выше. Понятно, что вычисленные минутные значения также будут систематически смещены от невозмущённого уровня, при этом 30% данных, которые содержат помехи амплитудой -1.5 нТл, дадут величину смещения в -0.5 нТл. Таким образом, усреднение не решает проблему.

### 3.1.4. Вычисление минутных данных

После тщательно и аккуратно выполненной обработки на этапе анализа первичных данных, вычисление минутных значений не представляет особой сложности, по сути, это просто формальный этап, хотя также требующий внимания.

Обработка выполняется с помощью скрипта `fge_process_min.m`. во многом повторяющего процедуры из `fge_process.m`:

```
>> fge_process_min
-----
Введите дату DD.ММ.YYYY [Enter, если 05.01.2018] ..... 24.11.2017
... Считываются данные GSM ... d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017\f2017327.pe0
... Считываются данные GSM ... d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\gsm\2017\f2017328.pe0
... Считываются данные FGE, точек 3 ...
d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\fge\2017\v2017327.pe0
!!! ... Выполняется отбор данных FGE для заданных моментов ...
... Чистка помех при зондировании ионосферы ...
... Чистка помех при зондировании ионосферы ...
... Считываются данные FGE, точек 3 ...
d:\Paratunka\data\FGE_GSM\momwe\fge\2017\v2017328.pe0
!!! ... Выполняется отбор данных FGE для заданных моментов ...
... Чистка помех при зондировании ионосферы ...
... Чистка помех при зондировании ионосферы ...
... Учитывается зависимость Z=f(dH,dD) ...
Текущие базисные ... +21775.64 нТ, -286.8895', +46833.47 нТ (за 24-Nov-2017)
Текущий градиент dFgrad = -21.71
... Вычисляем среднеминутные значения D,h,Z ...
```

1) выполняется инициализация параметров, постоянных, объявляются пути к файлам данных и т. п. - скрипт `\ini_parameters\fge_ini.m`;

2) по запросу вводится дата, для которой выполняется обработка;

3) считываются данные скалярного магнитометра GSM-90 за предыдущие и текущие сутки. Получение минутных значений как первичных данных в 00 секунд каждой минуты ("spot value") не требует считывания данных за предыдущие сутки, однако для сохранения единообразия это выполняется. Производятся стандартные процедуры корректировки времени, удаления задокументированных помех, чистка выбросов по пороговому значению, измеренные значения  $F_s$  редуцируются к основному постаменту в абсолютном павильоне (базисное значение  $F_0$  берётся из файла `\ini_parameters\dFgrad_current_FGE.dat`). Затем ряды за двое суток объединяются, при этом из предыдущих суток остаются только последние 5 минут измерений;

4) считываются данные FGE за предыдущие и текущие сутки. Здесь измерения за предыдущие сутки необходимы, т. к. вычисление минутного значения в 00:00:00 требует данные за последние 45 секунд в конце предыдущих суток. Выполняется корректировка моментов времени, удаление задокументированных помех, удаление помех от ионозонда, коррекция зависимости вертикальной компоненты от вариаций горизонтальных составляющих;

5) считываются базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ , принятые на текущую дату (из файла `\ini_parameters\baseline_current_fge.dat`). Если на текущую дату базисных нет, то берутся данные для ближайшей более ранней даты;

6) вычисляются полные значения составляющих  $H, D, Z$

$$\begin{aligned}H &= \sqrt{((H_0 + dH)^2 + dD^2)}, \\D &= D_0 + \text{atan}(dD/H), \\Z &= Z_0 + dZ,\end{aligned}$$

и модуль поля  $F_v = \sqrt{(H^2 + Z^2)}$ ;

7) корректируются данные по ординате (подробное описание представлено в Отступлении VII);

8) вычисляются минутные значения  $H_m$ ,  $D_m$ ,  $Z_m$ ,  $F_m$ . В соответствии с требованиями INTERMAGNET значения  $F_m$  – это мгновенные измеренные данные  $F$  в 00 секунд каждой минуты, т. е. без какой-либо дополнительной фильтрации. Процедура получения  $F_m$  построена на простом выборе значений  $F$  в требуемый момент времени. Средние значения составляющих вычисляются как взвешенные средние с весами, соответствующими распределению Гаусса. Значения весов генерируются с помощью функции `gauss_coeff_fun()`, на входе которой задаётся временной ряд, для которого вычисляются веса. При пропусках в данных выполняется перенормировка на сумму реально используемых весов. Поскольку вопрос о методе получения минутных значений достаточно актуален и часто дискутируется, рассмотрим его подробнее в Отступлении VIII;

9) минутные данные выводятся в файлы формата MATLAB для последующего специального



использования, а также в файлы по стандартам IAGA (IAGA2002) и INTERMAGNET (IMF). Для записи файлов выделены специальные каталоги, например, \mat, \data\_iaga2002 и \data\_IMN с подкаталогами в соответствии с годом. Файлы IMF-формата записываются в двух вариантах — с выводом HDZF-данных и выводом XYZF-данных; первый формат используется для отправки результатов в GIN INTERMAGNET;

10) рисуются графики результатов (см. рис. 30). В целом на этом этапе графически показаны секундные данные и вычисленные по ним минутные. На рис. 30а для Z-составляющей для наглядности специально выделен фрагмент кривой в начале суток — он показывает, что на графике отображаются не только текущие сутки, но и указанные выше 5 мин из предыдущих. Это сделано для контроля ситуации на границе суток, т. к. достаточно часто проблемы наблюдаются именно при смене суток, например, скачки, если базисные значения между сутками заметно изменились. Рис. 30б является хорошим ориентиром при оценке причины возможных выбросов в разностях минутных значений  $F_v$  и  $F_s$ . Количество секундных данных, используемых при вычислении минутных значений, напоминает магнитологу о выполненных им действиях по удалению помех, говорит о надежности итоговых данных, а при нулевом количестве будет указывать на пропуски.

Фрагменты стандартных выходных файлов приводятся ниже:

PET20171124pmin.min

```

Format                IAGA-2002
Source of Data        IKIR FEB RAS
Station Name          Paratunka (Petropavlovsk)
IAGA CODE             PET
Geodetic Latitude     52.971
Geodetic Longitude    158.248
Elevation             50
Reported              XYZF
Sensor Orientation    HDZF
Digital Sampling      0.5 seconds
Data Interval Type    1-minute INTERMAGNET filter (00:15 - 01:45)
Data Type             provisional
# F data are instant values at 00 second of every minutes
DATE    TIME          DOY    PETX    PETY    PETZ    PETF
2017-11-24 00:00:00.000 328    21486.83 -2375.07 47325.41 52029.02
2017-11-24 00:01:00.000 328    21486.00 -2375.26 47325.53 52028.74
2017-11-24 00:02:00.000 328    21486.26 -2375.54 47325.54 52028.92
...
2017-11-24 23:58:00.000 328    21483.41 -2376.30 47324.72 52027.09
2017-11-24 23:59:00.000 328    21483.39 -2376.46 47324.77 52027.17

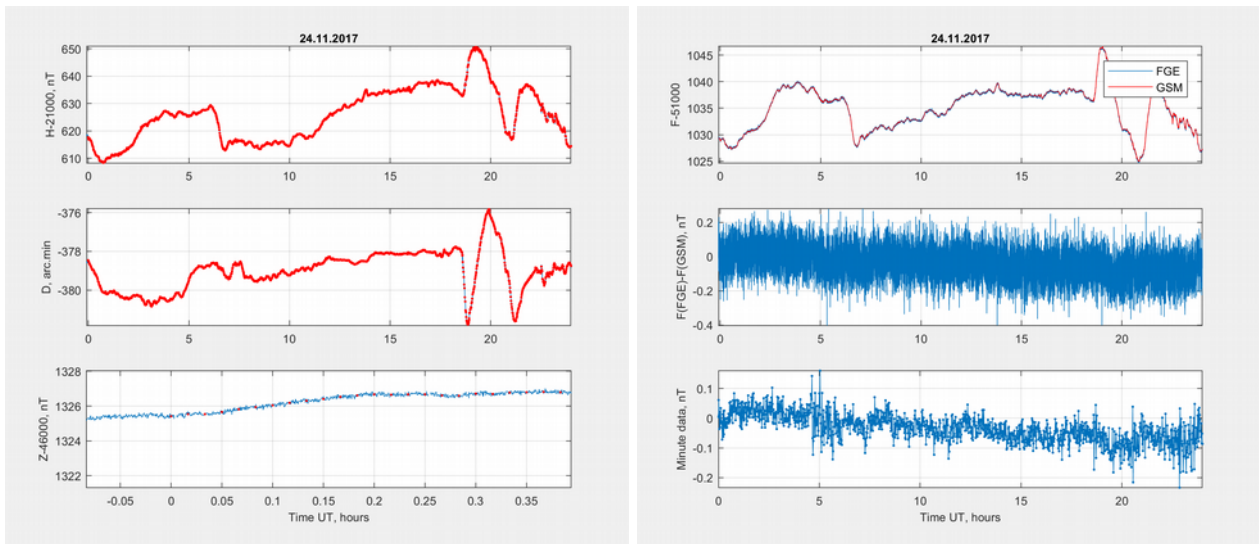
```

NOV2417.pet

```

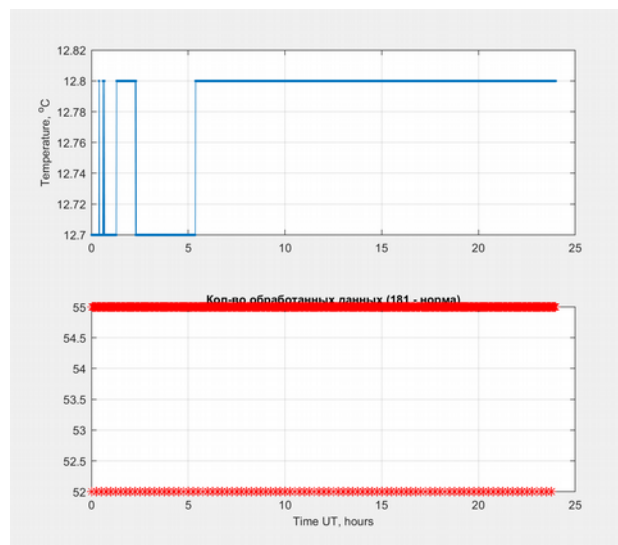
PET NOV2417 328 00 HDZF R EDI 03701582 000000 RRRRRRRRRRRRRRRR
216177 -37846 473254 520290 216169 -37850 473255 520287
216172 -37854 473255 520289 216174 -37860 473256 520291
216172 -37866 473258 520292 216169 -37868 473259 520292
...
PET NOV2417 328 23 HDZF R EDI 03701582 000000 RRRRRRRRRRRRRRRR
216258 -37913 473257 520327 216260 -37914 473258 520329
216260 -37918 473259 520331 216261 -37919 473261 520332
...
216141 -37862 473246 520268 216142 -37866 473246 520270
216144 -37871 473247 520271 216144 -37874 473248 520272

```



(a)

(б)



(в)

Рис. 30. Стандартные графические окна при вычислении минутных данных за сутки (скрипт `fge_process_min.m`). (а) — секундные (линия) и минутные (точки) полные значения составляющих  $H$ ,  $D$ ,  $Z$ . На графике для  $Z$  выделен только фрагментом вблизи начала суток. (б) — на верхней панели показаны секундные данные  $F_v$  и  $F_s$ , на средней панели — их разность, на нижней панели — разность  $\Delta F$  минутных значений  $F_v$  и  $F_s$ . (в) на верхней панели - температура вблизи регистратора Magdalog (минутные значения), на нижней панели — количество секундных значений, по которым вычислены минутные данные.

### 3.1.5. Контроль полученных файлов и публикация

Следующий шаг — контроль полученных файлов. В данном случае просто проверяется корректность формата записи в требуемые файлы минутных данных (форматы IMF и IAGA2002), используются скрипты `imag_read_pet.m` и `iaga2002_provisional.m`, соответственно. После запуска `imag_read_pet.m` и ввода даты (например, 22.12.2017) из файла DEC2217.PET считываются минутные данные и рисуются графики. Рисуются все составляющие, как те, что непосредственно записаны в файл (в данном случае —  $H$ ,  $D$ ,  $Z$ ,  $F$ ), так и вычисленные дополняющие компоненты ( $X$ ,  $Y$ ). Маркерами отмечаются пропущенные данные (при этом значимо только положение маркеров по времени, т. к. они имеют одну ординату, равную среднему за сутки значению). На рис. 31в представлены минутные

значения модулей  $F_v$  (вычисленного по  $H$ ,  $Z$  или  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) и  $F_s$ , а также их разность. Магнитолог обязан сопоставить отметки пропусков в данных с записями в журнале обработки, а также еще раз оценить кривую  $F_v - F_s$  (рис. 31в). В случае каких-либо несоответствий необходимо переобработать данные.

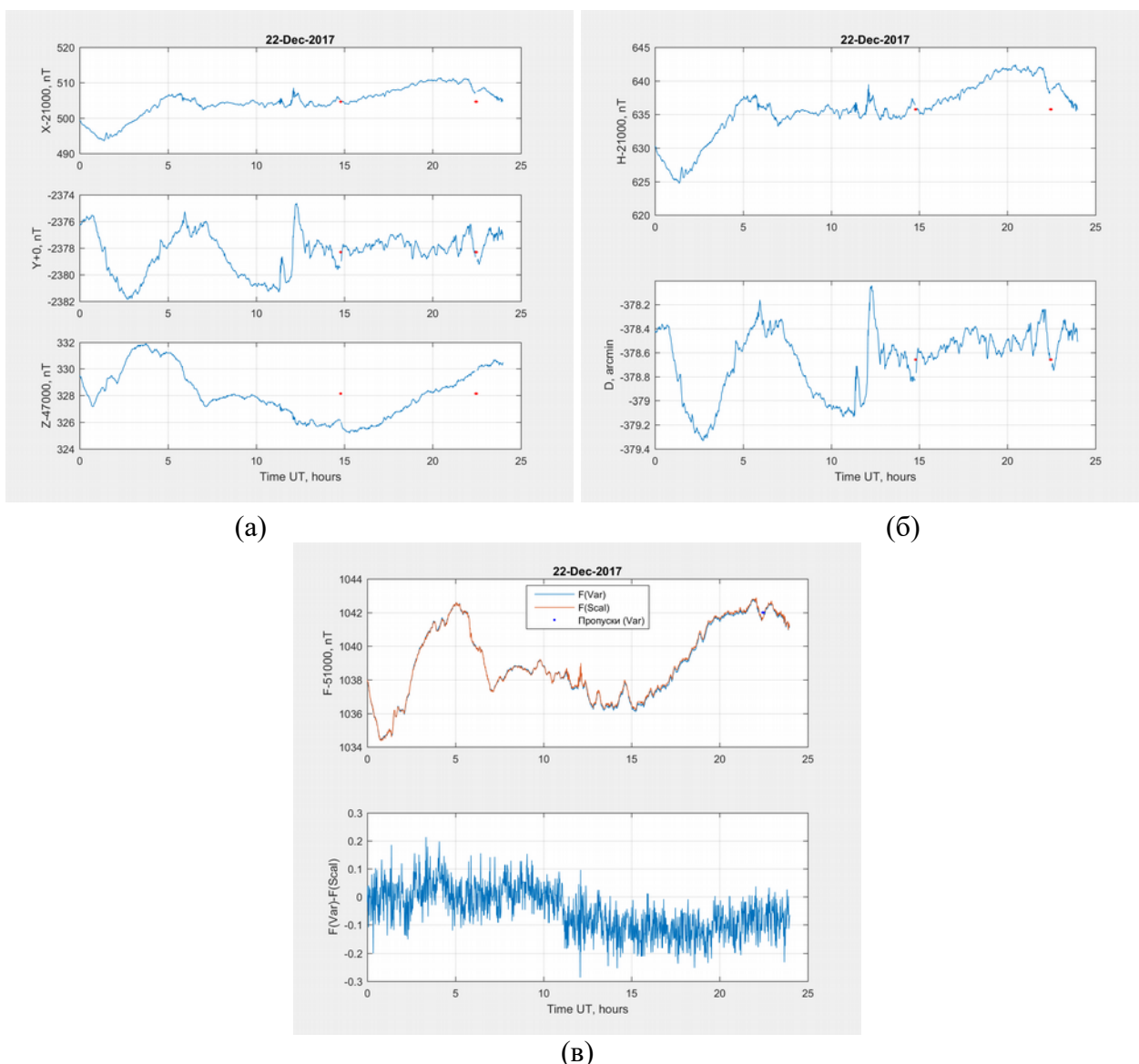


Рис. 31. Результаты считывания минутных данных из суточного файла DEC2217.PET в формате IMF.

Аналогично контролируется информация в файле PET20171222pmin.min – после запуска скрипта `iaga2002_provisional.m` на графики выводятся считанные из файла минутные данные. Необходимо отметить, что разности минутных значений  $F_v$  и  $F_s$ , полученные из файлов этих двух форматов, различаются. Это связано с ошибками округления — данные в IMF-файлах представлены до 0.1 нТл (в силовых составляющих), данные в файла IAGA2002 – до 0.01 нТл. Можно оспаривать достоверность и информативность 0.01 нТл, но округление до 0.1 нТл очевидным образом проявляется как увеличение шума.

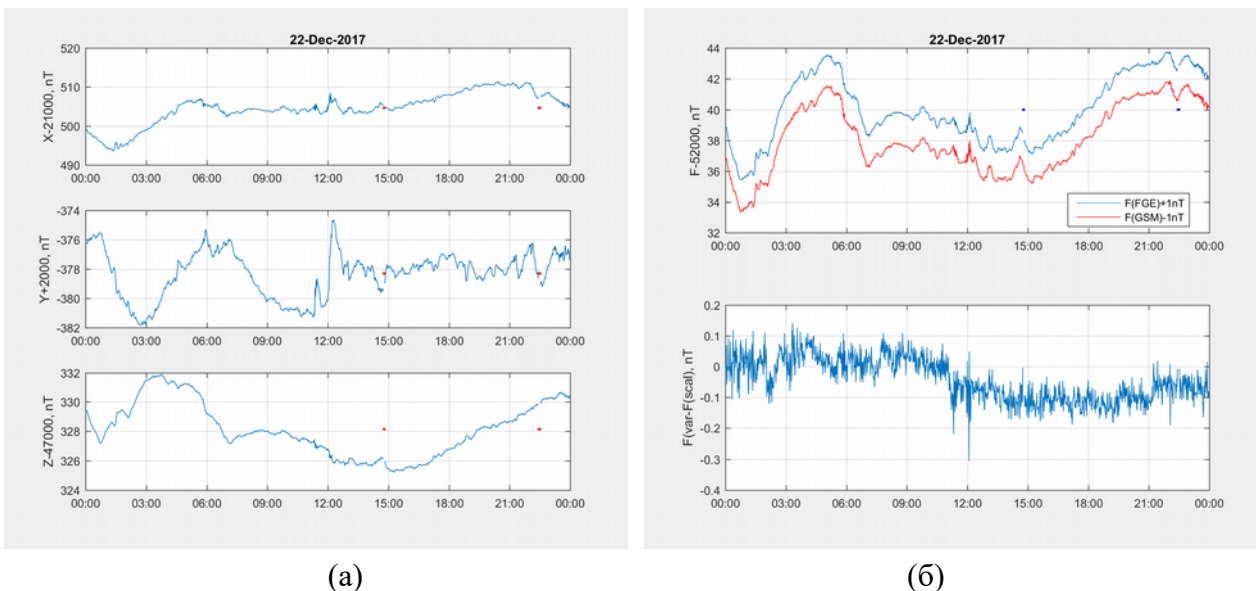


Рис. 32. Аналогично рис. 31, но минутные данные считываются из файла в формате IAGA2002.

После проверки подготовленного суточного файла минутных данных магнитологом на рабочем месте этот файл отправляется в GIN INTERMAGNET (Edinburgh для обсерваторий ИКИР ДВО РАН). Обязательным для процесса обработки является контроль поступления файла в GIN, а также полнота и корректность данных, которые стали доступными через сайты INTERMAGNET. Основание для такого контроля — передача данных по email. При таком методе передачи информации возможны ошибки магнитолога при подготовке письма с данными к отправке, вследствие чего они не поступают в GIN или поступают ошибочными. Кроме того, отправка сообщения по email не гарантирует его принятие и обработки со стороны почтового сервера GIN, например, из-за проблем с Интернетом или срабатывания систем защиты от спама (в этом случае даже получение контрольной копии сообщения на email адрес обсерватории не является подтверждением успешной передачи данных). Пример страницы на сайте GIN в Эдинбурге с запросом о наличии и полноте минутных данных обсерватории "Паратунка" показан на рис. 33, графики минутных данных за 23-24 ноября 2017 г. - на рис. 34.

### 3.1.6. Отступление VII. Коррекция секундных данных

Необходимость в такой коррекции возникает обычно при скачках записи внутри суток. При стандартной технологии учёта базисных линий с помощью одного постоянного значения за сутки, мы можем для полных суток использовать базисные значения, полученные либо до скачка, либо после. При этом запись либо второй части суток, либо первой окажется смещённой на величину скачка. На рис. 35 представлены вариации склонения D, полученные 21-23 декабря 2017 г. с помощью вариометра FGE на обсерватории "Паратунка". 22 декабря в 14:44UT на расстоянии около 160 км от обсерватории произошло землетрясение с классом 14.4. Как уже отмечалось, FGE является магнитометром с блоком феррозондовых датчиков на карданном подвесе. При прохождении сейсмической волны датчики раскачиваются, создавая фиктивные вариации магнитного поля. Землетрясение вызвало колебания в канале склонения до 100 нТл, затухающие в течение трёх минут. Эти колебания были удалены, чем и объясняется разрыв в данных на представленной кривой. Однако кроме эффекта колебаний, у FGE, установленного в Паратунке, после землетрясения происходит изменение базисных уровней —

после описываемого толчка запись D ушла вниз на 0.66'. Это хорошо видно по исходной кривой на рис. 35.

<?@page contentType="text/html"%> <?@page pageEncoding="UTF-8"%>



### Edinburgh INTERMAGNET Geomagnetic Information Node - Data Directory

| LAGA code | Date       | Number of adj-or-rep data points | Number missing | Percentage available | Gap details                     |
|-----------|------------|----------------------------------|----------------|----------------------|---------------------------------|
| PET       | 10-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 11-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 12-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 13-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 14-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 15-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 16-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 17-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 18-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 19-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 20-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 21-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 22-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 23-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 24-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 25-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 26-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 27-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 28-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 29-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 30-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 31-12-2017 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 01-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 02-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 03-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 04-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 05-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 06-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 07-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 08-01-2018 | 1440                             | 0              | 100%                 |                                 |
|           | 09-01-2018 | 0                                | 1440           | 0%                   | Gap from 00:00:00 to end of day |

Comments [Mail the webmaster](#)

Рис. 33. Скриншот страницы с результатами запроса наличия данных обсерватории "Паратунка" на сайте GIN в Эдинбурге (<http://geomag.bgs.ac.uk>).

На обсерватории "Паратунка" абсолютные наблюдения выполняются практически ежедневно, утром и вечером. Поэтому не было проблем с определением реальных базисных значений  $D_0$  до и после землетрясения — они составили  $-287.19'$  и  $-286.54'$ , соответственно. Величина скачка  $-0.66'$  была определена сравнением данных FGE с данными компонентного магнитометра FRG-601, который жестко связан с постаментом и не реагирует на механические движения основания. В соответствии с технологией получения полных значений элементов магнитного поля, уменьшение значений вариаций  $dD$  привело к увеличению базисного значения  $D_0$ , а уровень  $D = D_0 + dD$  при этом не изменился. Проблема заключается в том, что для суток со скачком (22 декабря) мы можем использовать только одно базисное значение. В данном случае выбрано  $D_0$ , которое было до скачка — как следствие, уровень полного значения  $D$  до 14:4UT (до скачка) не изменился. Аналогично, уже с новыми базисными  $D_0$ , в которых скачок нашёл отражение, не изменились полные  $D$  за 23 декабря. Однако фрагмент записи  $D$  с 14:44 до конца суток 22 декабря получился смещённым вниз.

Чтобы скорректировать это смещение, используется функция `correction_sec_data_fge_gsm_fun()`, при выполнении которой считывается информация из специального файла `\ini_parameters\Correction_SecondVal_FGE-GSM.dat`, где записана информация



о дате и времени начала и конца фрагмента, который требуется корректировать, и величина коррекции для каждой из составляющих и модуля. Пример записи в файле для данного события представлен ниже:

```
% YY MM DD hh mm ss YY MM DD hh mm ss Hj DJ Zj Fj
% nT arcmin nT nT
2017 11 16 23 10 41 2017 11 16 23 59 59 +00.70 -00.450 -00.30 +00.00
2017 12 22 14 45 54 2017 12 22 23 59 59 -00.57 +00.662 +00.30 +00.00
```

После этого для всех значений в отмеченном интервале вводится поправка. Определённую сложность, требующую дополнительного внимания, представляет корректный учёт поправок на границах суток. Результат работы функции показан красной кривой на рис. 35

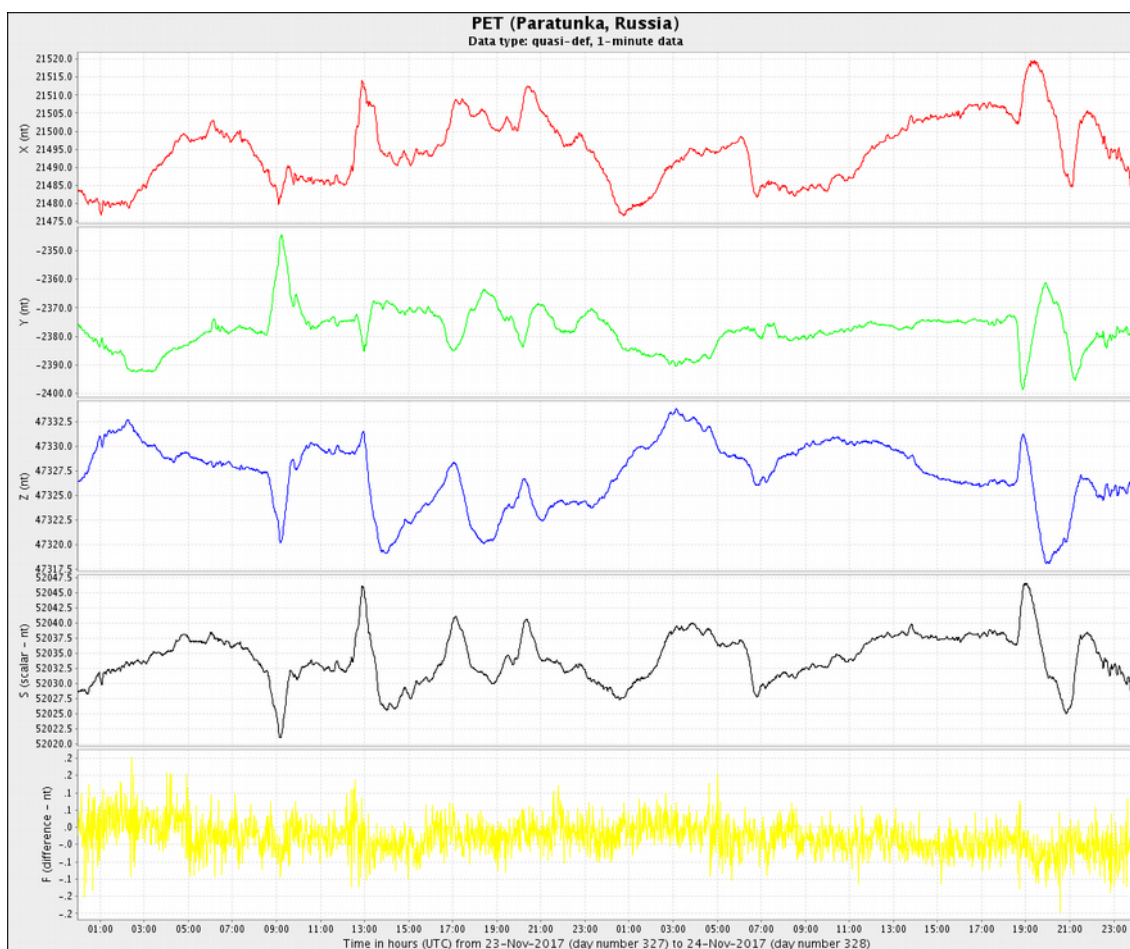


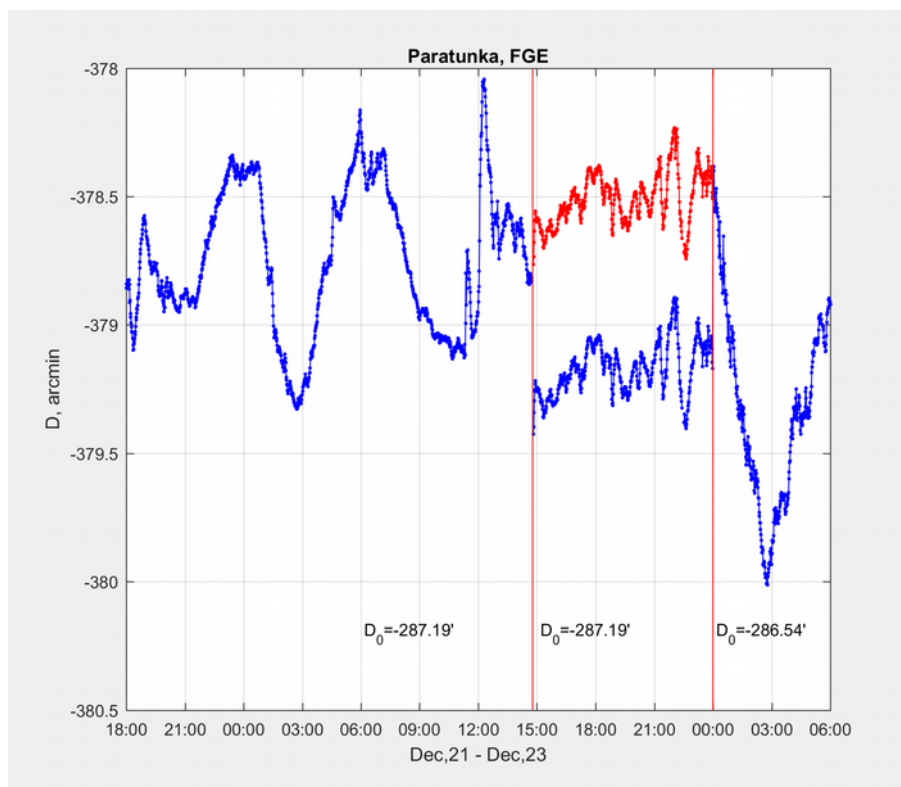
Рис. 34. Графический файл, сформированный по запросу при просмотре минутных данных обсерватории "Паратунка" на сайте GIN в Эдинбурге (<http://geomag.bgs.ac.uk>).

### 3.1.7. Отступление VIII. Вычисление минутных значений

Корректное вычисление минутных значений — важная часть работы обсерватории, поскольку именно эти данные становятся доступными для научной общественности через систему INTERMAGNET. В этом вопросе существуют дискуссионные моменты:

1) имеется консенсус в отношении того, что минутные значения составляющих вектора должны быть получены именно усреднением. Однако, встречаются

случаи, когда вместо взвешенного усреднения с помощью гауссовских весовых коэффициентов (ширина весовой функции от -45 до +45 секунд) используется простое арифметическое среднее (ширина окна от -29 до +30 секунды). Выбор гауссовской фильтрации магнитных данных хорошо обоснован в (Jankowski, J., Sucksdorff, C.: Guide for magnetic measurements and observatory practice, Warsaw, 235 pp., 1996; раздел 7.1). Понятно, что процедура скользящего арифметического среднего очень проста и представлена как стандартная функция во многих распространённых пакетах, таких как Excel, LibreOffice Calc и других, а также в библиотеках функций для различных языков программирования. Это обстоятельство может оказаться решающим при отсутствии у обсерватории возможностей для реализации более сложной гауссовской фильтрации;



**Рис. 35.** Пример коррекции данных при скачке 22.12.2017 г. в 14:45UT, который получился в канале склонения магнитометра FGE из-за землетрясения. Синяя кривая представляет исходные данные, красная (верхняя, между отметками скачков) — после коррекции.

2) существуют некоторые разногласия в отношении момента времени, на который центрируется минутное значение. Стандартом INTERMAGNET определено, что минутное значение относится к началу минуты, т. е. к моменту 00 секунд. Этим предполагается, что центральный весовой коэффициент приходится именно на этот момент времени. Однако, возникают вычислительные сложности, связанные с тем, что при вычислении первого минутного значения в сутках 00:00:00 необходимо использовать последние 45 с данных в предыдущих сутках. Это заметно усложняет логику программы и создаёт проблемы, если на границах суток имеются скачки. Ещё более интересная коллизия возникает для 00:00:00UT 1 января, когда требуется использовать данные предыдущего года. Как следствие, возникает желание вычислять минутное значение, используя исходные (секундные) данные в пределах одной минуты, т. е. с 00 до 59 секунды, с



центрированием на середину минуты. В качестве обоснования такого решения в том числе используется аргумент, что такая методика является аналогом вычисления средних значений за час и сутки. Понятно, что вопрос может дискутироваться, однако на практике необходимо использовать только один вариант, в данном случае — требования стандарта INTERMAGNET. Альтернативный метод будет приводить к тому, что минутные данные, записанные в файлы без отметок времени (форматы IMF - INTERMAGNET GIN Dissemination Format for Minute Values или IAF - INTERMAGNET Archive Format) могут интерпретироваться по-разному по отношению ко времени;

3) наиболее дискуссионный вопрос — это вопрос о способе получения минутных значений модуля поля  $F_v$  (INTERMAGNET Technical Reference manual. Version 4.6, Edited by Benoit St-Louis, 92 pp.) на стр.6 говорится "*A scalar magnetometer must provide a sample centered on the same time as the output of the digital filter used with the vector magnetometer*", т. е. необходимо использовать отсчёт  $F_v$ , полученный в тот же момент времени, на который центрируется минутное среднее значение вариационного магнитометра. Таким образом, на наш взгляд, изложенное выше показывает, что к данным скалярного прибора цифровой фильтр не должен применяться.

Однако, обоснованность такого подхода не очевидна. Основной аргумент: данные скалярного магнитометра  $F_s$  являются опциональными, т. к. модуль поля  $F_v$  может быть посчитан по полным значениям составляющих  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  или  $H$ ,  $Z$ , получаемых вариометром. Поэтому при наличии  $F_v$  нет особого смысла просто дублировать эти данные независимыми  $F_s$ , полученными по той же методике вычисления минутных значений. При этом не-усреднённые  $F_s$  несут дополнительную информацию о реальных шумах поля на частотах выше  $1/60 \text{ c}^{-1}$  и анализ разностей  $\Delta F = F_v - F_s$  может показать более объективную картину помех на обсерватории, при отсутствии у пользователя первичных данных. Признётся, что при таком подходе разность  $F_v - F_s$  становится чувствительной к быстрым естественным изменениям магнитного поля — при сильных возмущениях  $\Delta F$  может дать отклонения до единиц-десятков нТл, что обычно вызывает необоснованную настороженность у магнитолога-обработчика, поскольку  $\Delta F$  очень часто используется для контроля качества полученных данных. Кроме того, простая выборка мгновенных минутных значений создает эффект наложения спектров (aliasing).

Противоположное мнение заключается в том, что поскольку  $F_s$  является опциональной, то её основная задача — независимый контроль данных вариационного магнитометра. Эффективность контроля будет максимальной, если оба минутных значения,  $F_v$  и  $F_s$ , получены одинаковым способом. При этом признаётся, что  $\Delta F$  позволяет в определённой степени контролировать только силовые элементы поля, в том числе, достоверность их базисных значений. Опыт автора, который много лет является представителем INTERMAGNET по проверке первого уровня итоговых (Definitive) файлов ряда обсерваторий, показывает что по мгновенным значениям  $F_s$  гораздо труднее оценивать качество представляемых данных, в особенности, если большие значения  $\Delta F$  возникают не во время сильных магнитных возмущений, а, например, при быстрых и небольших вариациях (пульсациях) — становится трудно различить эффект от помех и эффект от пульсаций. Кроме того, возможны случаи, когда обсерватория удаляет

данные  $F_s$  с помехами, которые дают заметные отклонения в  $\Delta F$ , при том, что эти помехи также присутствуют и в данных вариационного магнитометра. Наиболее неприятный вариант, когда на основании значительных  $\Delta F$  выполняется отбраковка данных, не содержащих помех, например, при сильных пульсациях.

На рис. 36 в качестве примера показаны разности минутных значений  $F_v$  и  $F_s$  за сутки с возмущённым магнитным полем. Минутные  $F_s$  были получены двумя путями — как мгновенные (spot) значения в 00 с, так и с помощью гауссовского фильтра (filtered). Как видим, мгновенные минутные  $F_s$  дают разброс в  $\Delta F$  до  $\pm 1.5$  нТл и скрадывают картину возможного расхождения между  $F_s$  и  $F_v$ , связанного с недостоверными измерениями вариационного магнитометра или помехами. Однако есть и обратная сторона. Допустим, в результатах измерений  $F_v$  и  $F_s$  появилась импульсная помеха амплитудой до 10 нТл. При формальной обработке, без контроля помех, фильтрация  $F_v$  и  $F_s$  приведёт к тому, что выброс останется в минутных данных в виде небольшой аномалии амплитудой до 0.2 нТл. В разности  $F_v - F_s$  она, конечно, будет практически нулевой. При использовании мгновенного  $F_s$  картина получается другой: если помеха попадает в выбранное  $F_s$ , то в  $\Delta F$  она проявится как выброс амплитудой 10 нТл. Обычно, этот выброс в минутных данных просто удаляют. Но при этом в  $\Delta F$  остаётся аномалия с амплитудой 0.2 нТл, которую, в принципе, можно видеть. Подобная картина получится и при несовпадении помехи с мгновенным  $F_s$ . Достаточно часто подобные вопросы возникают и обсуждаются при проверке итоговых (Definitive) данных, когда проверяющий ограничен только минутными данными и не имеет возможности сравнивать исходные секундные ряды.

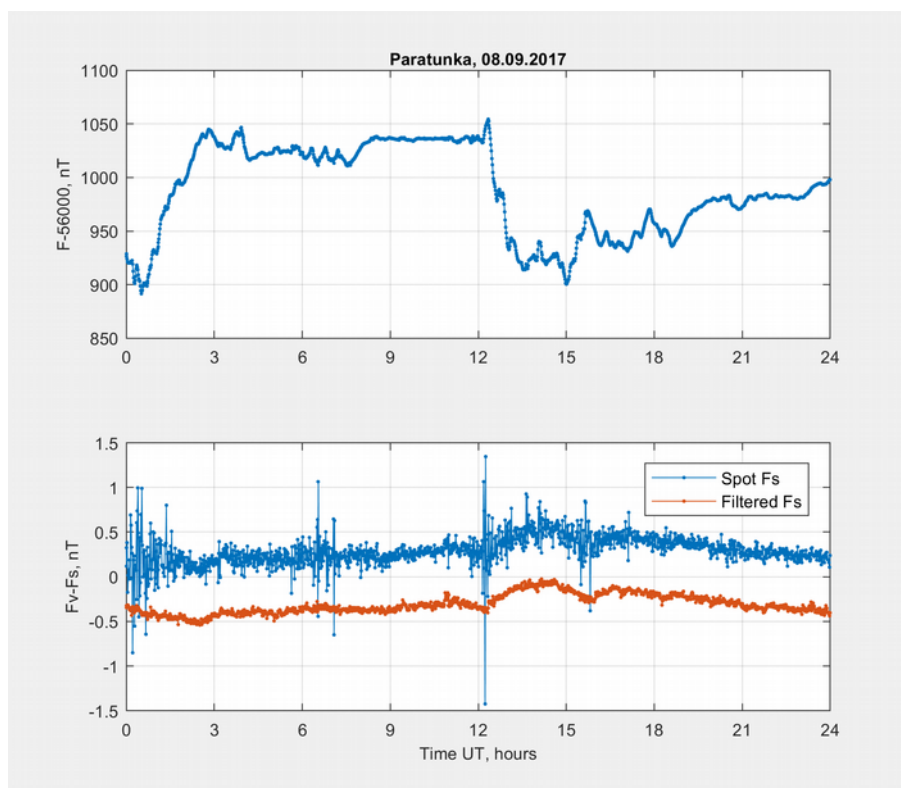


Рис. 36. Сравнение эффекта сглаженных (filtered) и мгновенных (spot) минутных значений  $F_s$  скалярного магнитометра в разности  $\Delta F = F_v - F_s$ .

### 3.1.8. Подготовка квази-окончательных данных

Квази-окончательные (Quasi-definitive - QD) данные как особый класс магнитных данных были введены в системе INTERMAGNET не так давно. Основная причина — необходимость иметь данные, близкие по качеству к окончательным (Definitive), но при этом получать их с задержкой не полгода-год, а в течение месяца или более оперативно. Потребность иметь такие данные во многом связана с поддержкой наземными наблюдениями магнитных измерений, выполняемых на спутниках (программы SWARM, ARASE и др.), а также с необходимостью более оперативного наполнения реальными данными разрабатываемые модели магнитного поля Земли.

Основное требование при подготовке QD-данных — использование базисных значений, близких к тем, что будут получены при подготовке данных статуса Definitive, расхождение не должно превышать 5 нТл (<http://intermagnet.org/faqs-eng.php#quasi-definitive>). Конечно, эти данные должны быть очищены от помех и пропуски заполнены данными резервных магнитометров, однако основное внимание уделяется качеству (достоверности) именно используемых базисных значений. На наш взгляд, одна из причин такого отношения к базисным линиям связана с обычной практикой работы с данными, принятой на магнитных обсерваториях. Во многих случаях абсолютные наблюдения делаются достаточно редко, например, раз в неделю, а иногда и раз в месяц. Это объяснимо и, возможно, допустимо, если имеется высокая стабильность базисных линий вариационных магнитометров, установленных на этих обсерваториях. Однако при таких редких абсолютных наблюдениях невозможно корректно оценивать поведение базисных линий до следующих наблюдений. Соответственно, использование последних реально измеренных базисных значений на неделю вперёд — процедура достаточно ненадёжная, если говорить о требованиях к базисным на уровне статуса Definitive. Еще один аспект — даже при достаточно частых абсолютных наблюдениях полноценная обработка их результатов не выполняется, в некоторых случаях при вычислении минутных данных в качестве текущих базисных используются принятые на начало года. Поэтому подготовка QD-данных, если она ведётся, подталкивает обсерватории к оптимизации режима работы с базисными значениями.

На обсерваториях ИКИР ДВО РАН, использующих описываемое здесь ПО, процедура подготовки QD-данных не представляет особой сложности. Действительно, контроль качества данных вариационного и скалярного магнитометров (отбраковка помех, коррекция сбоев и т.п.) выполняется на стадии ежедневной оперативной обработки. Абсолютные наблюдения выполняются достаточно часто, интервалы между наблюдениями не превышают 2-3 дня. Обработка результатов и вычисление базисных значений делаются непосредственно после измерений, контроль достоверности полученных результатов является обязательной процедурой в цикле обработки. Таким образом, на обсерватории практически в реальном времени имеется база данных о наблюдаемых базисных значениях, проверенная и почищенная от недостоверных значений. Технология вычисления принятых (текущих) ежедневных базисных значений использует сглаживающий сплайн и все предыдущие данные для оценки его параметров, т. е. на текущие сутки делается достаточно надёжный прогноз о базисных значениях. Соответственно, оценка принятых базисных значений на более ранние даты ещё более надёжная. Фактически мы используем базисные значения, близкие к тем, которые будут получены при подготовке данных Definitive. Однако, бывают моменты, когда по результатам текущих абсолютных наблюдений получены базисные значения, заметно отличающиеся от предыдущих. например, из-за резкого изменения температурного режима в

вариационном павильоне или из-за скачков. В этом случае требуются наблюдения в следующие двое-трое суток, чтобы понять как реально себя ведут базисные линии — и в этих случаях именно QD-данные будут свободны от ошибок из-за неправильно принятых текущих базисных значений.

Подготовка QD-данных близка к стандартной. На первом этапе готовятся принятые базисные значения, которые будут использоваться при вычислении минутных данных.

Используется скрипт **base\_plot\_fge\_qd.m**.

```
>> base_plot_fge_qd
----- Подготовка Adopted базисных значений ---
      для вычисления quasi-definitive данных
!!!   корректируем лично-инструментальные разности H0 и Z0 для Райкевич   !!!
01-Oct-2015 --- 31-Dec-2020
Вывод в файл \ini_parameters\BLV_to_QD_Current.dat
Вывод минутных базисных в файл BLV_to_QD_Current_Minute.mat
```

После его запуска иницируются константы и параметры, необходимые для обработки, и считываются файлы с наблюдаемыми базисными значениями H0, D0, Z0 (**blv\_fge.dat**) и F0 (**dFgrad\_Obs\_FGE.dat**). Весь многолетний массив данных ограничивается интервалом за последние 90 суток и выбираются данные для основного fDI-магнитометра, с флагом достоверности равным 1. Вводится поправка за личную систематическую погрешность в H0, Z0 наблюдателя RAY обсерватории "Паратунка". Далее убираются скачки в базисных линиях и выполняется аппроксимация исходных данных сглаживающим сплайном (функция `csaps()` из пакета MATLAB).

Здесь необходимо специально отметить — принятые (Adopted) базисные значения вычисляются на каждую минуту, в отличие от стандартных принятых базисных, получаемых как одно значение в сутки. На рис. 37 показаны базисные значения магнитометров FGE и GSM-90 обсерватории "Паратунка", подготовленные для вычисления минутных QD-данных.

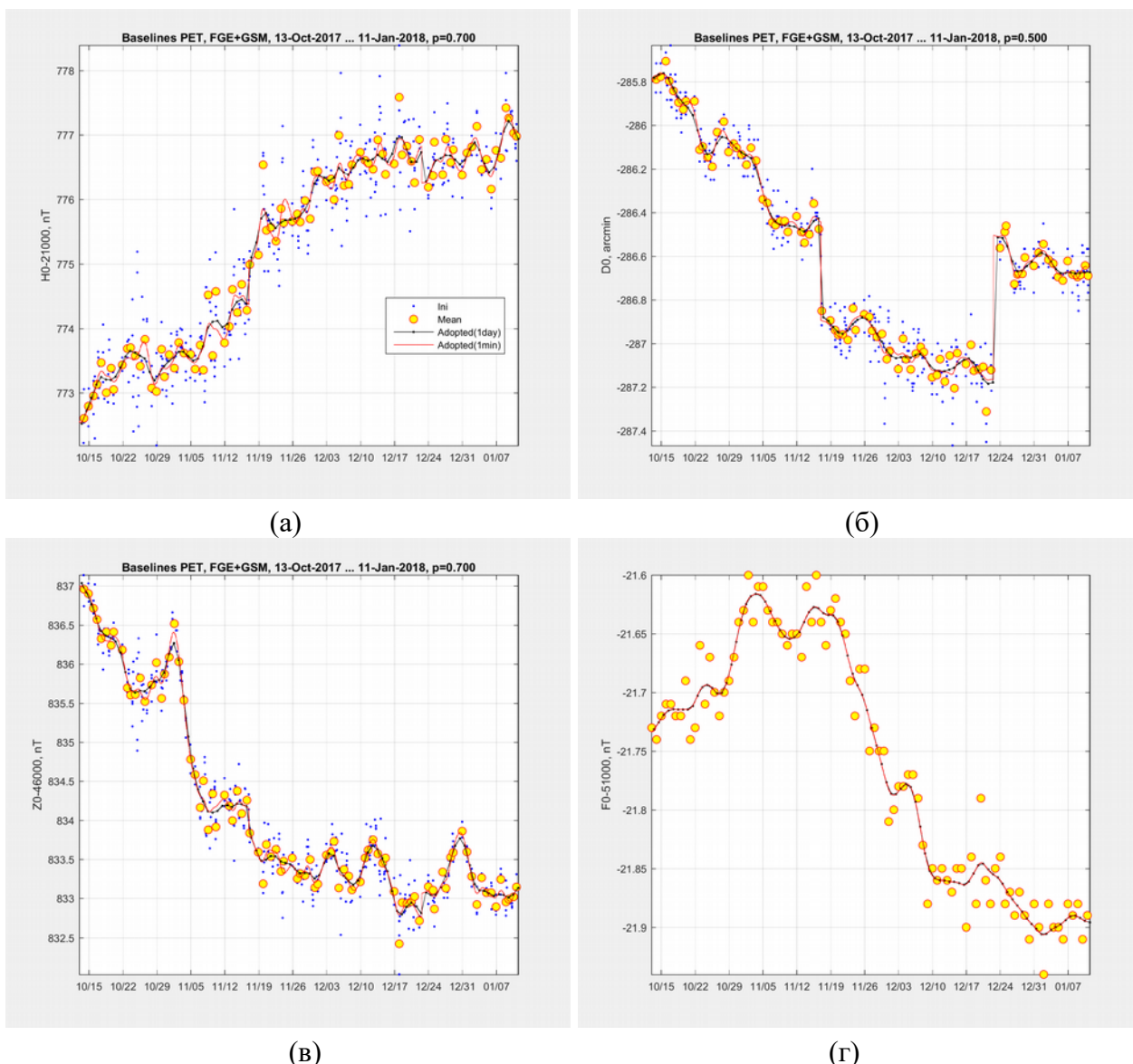
Использование минутных принятых базисных значений решает несколько проблем:

1) при быстрых изменениях реальных базисных линий использование среднесуточных значений идентично применению аппроксимации гладкого реального хода ступенчатой функцией, т. е. на границах суток возникают скачки, величина которых зависит от скорости изменения базисных. Например, постоянный тренд 3 нТл за месяц будет создавать междусуточные скачки в 0.1 нТл, т. е. вполне заметную величину, в особенности при сравнении измерений двумя магнитометрами, например, Fv и Fs. Локальные по времени междусуточные изменения базисных линий могут быть и больше, например, при сильных изменениях температуры в вариационном павильоне. Использование минутных базисных значений полностью снимает эту проблему;

2) аппроксимация суточными значениями может рассматриваться как попытка представить реальный ход базисных линий ступенчатой функцией. Ясно, что такое представление физически неадекватно, т. е. является источником ошибок в итоговых полных значениях составляющих вектора поля;

3) если абсолютные наблюдения растянуты по времени, например, выполняются утром и вечером по локальному времени, то аппроксимация наблюдаемых базисных значений гладкой кривой, например, сглаживающим сплайном, с минутным шагом и подходящей глубиной сглаживания, может более корректно представить возможные внутрисуточные изменения

базисной линии;



**Рис. 37.** Пример графического вывода базисных значений  $H_0, D_0, Z_0, F_0$  магнитометров FGE и GSM-90 для вычисления квази-итоговых (Quasi-definitive) минутных данных. "Ini" – наблюдаемые базисные значения, "Mean" – средние за сутки, "Adopted" – суточные (вычисленные на середину каждых суток) и минутные принятые значения.

4) при использовании минутных базисных значений можно в значительной степени избежать сложностей, возникающих при обработке вариационных данных со скачками внутри суток (см. Отступление I). Это видно на рис. 37(б), на котором скачок  $D_0$  после землетрясения 22.12.2017 г. вполне адекватно представляется минутными базисными, но требует специальной коррекции  $D$  при использовании среднесуточных базисных значений;

5) с точки зрения технологии вычислений в системе MATLAB (и не только) использование минутных базисных значений упрощает процесс вычисления полных значений составляющих, т. к., по сути, необходимо просто сложить два ряда минутных данных одинаковой длины — базисных и вариаций.

Обычное сомнение в необходимости использования минутных базисных значений: "Откуда

известно, что базисная линия внутри суток ведёт себя так, как получается при аппроксимации с минутным шагом?" Аргумент не достаточно убедительный, т. к. использование одного значения в сутки идентично предположению, что базисное значение остаётся постоянным внутри суток, т. е. все имеем 1440 одинаковых минутных значения — а это предположение зачастую не соответствует действительности.

Следующий этап — вычисление минутных значений полных составляющих вектора и модуля поля. Используется скрипт **fge\_cycle\_min\_qd.m**, в котором задаётся начальная и конечная даты, для которых выполняются вычисления, и организуется цикл по суткам. В каждом шаге цикла выполняется скрипт **fge\_process\_min\_cycle\_minblv\_qd.m**, который функционально близкий ранее описанным модулям для вычисления минутных значений:

- считываются исходные данные скалярного магнитометра GSM-90 за текущие и предыдущие сутки, корректируются отметки времени, удаляются документированные помехи и отдельные выбросы и сутки объединяются в один массив;

- считываются исходные данные компонентного магнитометра FGE, выполняется коррекция отметок времени, удаляются задокументированные помехи и помехи от ионозонда, сутки объединяются в один массив и учитывается зависимость  $Z$  от вариаций в горизонтальных составляющих;

- вычисляются минутные значения вариаций  $dH_m$ ,  $dD_m$ ,  $dZ_m$  с помощью весовых коэффициентов Гаусса и выбирается мгновенное значение  $F_m$  в 00 секунд;

- считываются минутные значения базисных и вычисляются полные значения составляющих вектора поля  $H_m$ ,  $D_m$ ,  $Z_m$ ,  $F_m$ ;

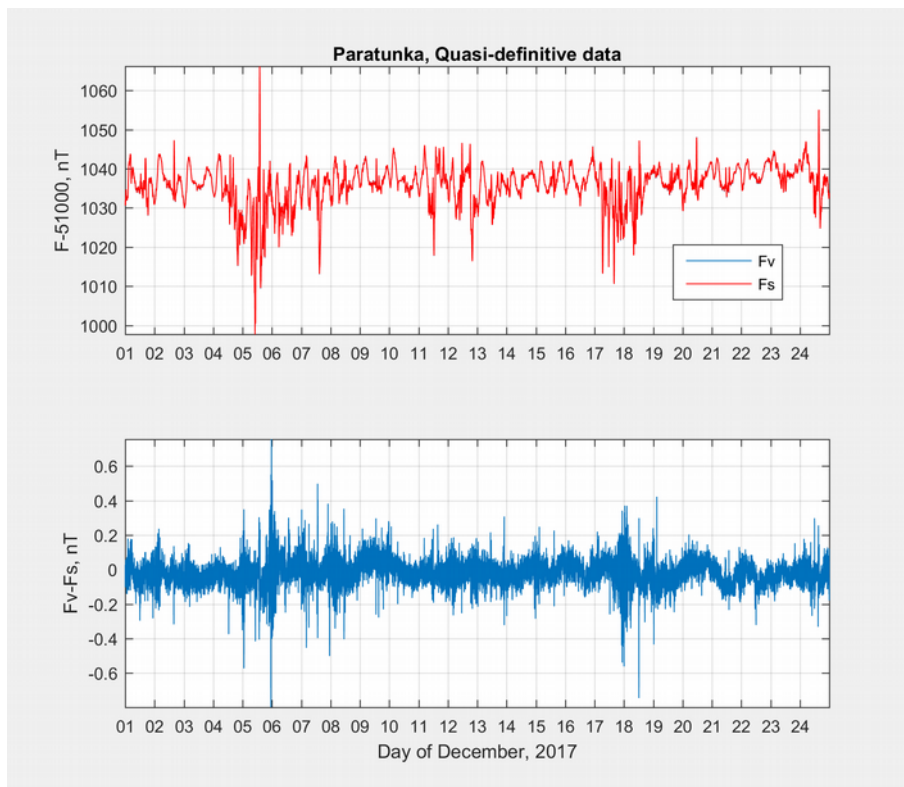
- корректируются минутные данные (эта процедура подобна коррекции секундных данных), информация о временных интервалах, требующих коррекции, и величине поправок задана в файле **\ini\_parameters\Correct\_minute\_FGE\_GSM.dat**;

- вывод минутных QD-данных в суточный файл формата IAGA2002.

На обсерватории "Паратунка" QD-данные готовятся с задержкой в одну неделю — предполагается, что за этот срок в характере поведения базисных линий не останется существенных неясностей. Обработка выполняется сразу за семь суток — таким образом, максимальная задержка между первыми сутками обрабатываемого интервала и сутками, когда выполняется обработка, составляет 2 недели. Контроль полученных QD-данных обеспечивается двумя путями:

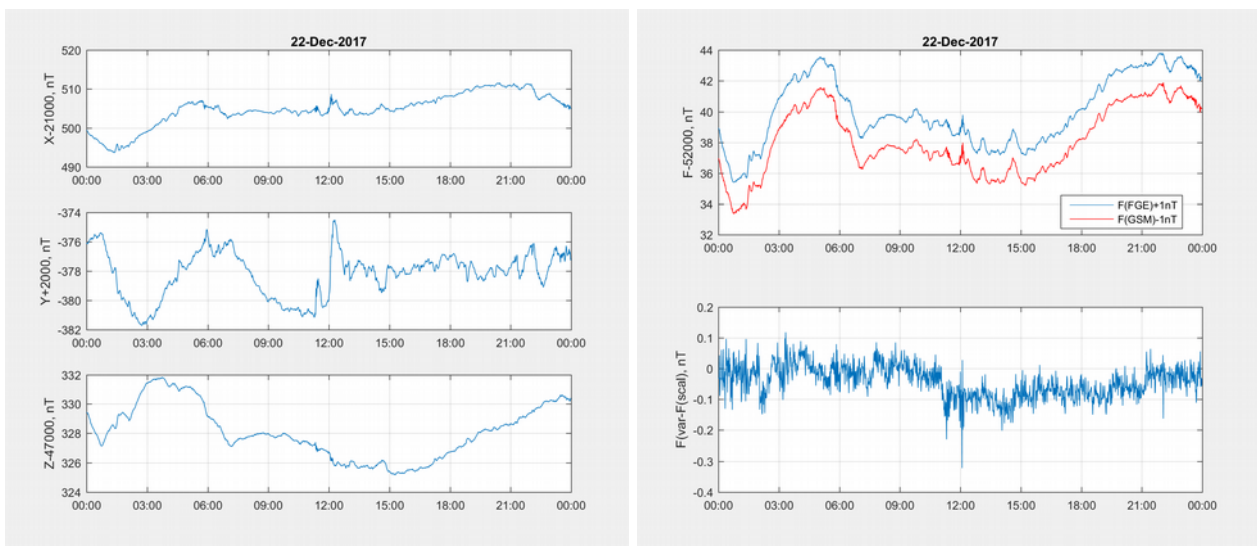
- все файлы текущей обработки и файлы за неделю или две до этого считываются единым массивом с помощью функции **iaga2002\_read\_fun\_list()** и рисуются минутные значения  $F_v = F(X_m, Y_m, Z_m)$ ,  $F_s$  и их разность  $F_v - F_s$  (см. рис. 38). Кроме того, с помощью скрипта **iaga2002\_plot.m** посуточно просматриваются все обработанные данные (см. рис. 39).





**Рис. 38.** Минутные QD-данные обсерватории "Паратунка" за 1-24 декабря 2017 г. Верхняя панель — модули поля  $F_v$  и  $F_s$ , нижняя панель — разности  $F_v-F_s$ .

После проверки файлы по электронной почте или через WEB-форму передаются в GIN INTERMAGNET (Эдинбург) и через сайт GIN визуально проверяется наличие переданных данных и их корректность.



**Рис. 39.** Минутные QD-данные обсерватории "Паратунка" за 22.12.2017.



#### 4. Подготовка окончательных (Definitive) данных

Подготовка окончательных данных (Definitive — в дальнейшем для сокращения будем использовать термин D-данные или аббревиатуру DD) является одним из важнейших этапов в работе обсерватории, поскольку именно эти результаты становятся публичным итогом обсерватории за год и в соответствии со статусом этих данных в INTERMAGNET практически не подлежат изменению. Именно поэтому данные в статусе Definitive проходят тройной контроль — при подготовке на обсерватории, со стороны специального проверяющего, назначенного OPSCOM INTERMAGNET из числа магнитологов, имеющих большой опыт работы на магнитных обсерваториях, и со стороны руководителя комиссии по итоговым данным в OPSCOM.

Стандартная процедура подготовки данных Definitive начинается с объявления (рассылка email) со стороны руководителя комиссии по итоговым данным INTERMAGNET о начале и условиях процедуры подготовки и назначении даты, к которой каждая обсерватория должна эти данные представить для проверки (на специальном FTP-сервере 1-го уровня — "1st step FTP") — обычно это 1 июля года, следующего за годом, для которого готовятся данные. Затем выполняется проверка DD со стороны специального проверяющего, вносятся изменения, правки, идёт согласование. После успешного завершения этого этапа проверяющий загружает DD на FTP-сервер 2-го уровня ("2nd step FTP"), где они проходят проверку руководителем комиссии INTERMAGNET по Definitive данным. Если данные принимаются, они становятся доступными для пользователей через главный сайт INTERMAGNET [www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org), а по истечению срока подготовки издаются на DVD и рассылаются обсерваториям.

Итоговые данные обсерватории за год включают определённый набор файлов, которые обязательно должны быть подготовлены и представлены:

- 12 месячных файлов, содержащих минутные, часовые и суточные значения полных составляющих вектора поля, K-индексы и мета-данные об обсерватории (код IAGA, координаты, список записанных в файлы элементов поля и др.). Данные в файлах записаны в бинарном виде, формат IAF;
- файл базисных значений (наблюдённых и принятых);
- файл среднегодовых значений;
- файлы с информацией об обсерватории и стране.

Форматы всех файлов подробно описаны INTERMAGNET Manual и на сайте INTERMAGNET <http://www.intermagnet.org/data-donnee/formatdata-eng.php>.

Личный опыт автора как проверяющего данные Definitive ряда обсерваторий, а также общение с коллегами показывает, что во многих случаях процесс подготовки итоговых данных является проблематичным и трудоёмким. Это приводит к тому, что реально данные могут быть подготовлены с задержкой на год и более. Основная причина, на наш взгляд, отсутствие на обсерваториях полноценной работы с результатами измерений в течение года — достаточно часто обсерватория в оперативном режиме присылает "сырые" данные, полученные непосредственно с регистрирующей системы магнитометров, если ПО

регистратора предусматривает вычисление минутных значений, или с минимальными действиями для подготовки данных в формате, требуемом для отправки в GIN. Понятно, что когда начинается полноценная обработка магнитных измерений, включая вычисление базисных значений и пр., обсерватория сталкивается со значительными трудностями: ошибочные абсолютные наблюдения уже не переделаешь, шумы, помехи и сбои в результатах непрерывных измерений оказываются непозволительно большими из-за того, что не были своевременно обнаружены, часть данных потеряна, а результаты резервных магнитометров, необходимые для заполнения пропусков, недостоверны и др. Более того, очень часто информация о проблемах при измерениях в журналах работ на обсерватории представлена очень сжато, если таковая вообще имеется, а важные при обработке этих данных подробности уже невозможно восстановить. Определённая часть проблем, конечно, связана с отсутствием удобного, эффективного, дружески ориентированного программного обеспечения, необходимого для подготовки итоговых данных, а также с отсутствием персонала с требуемым уровнем квалификации.

На обсерваториях ИКИР ДВО РАН в целом, и на обсерватории "Паратунка" в частности, описанные выше проблемы при подготовке данных Definitive отсутствуют или представлены в незначительной степени. Практически все вопросы с обработкой решены ещё в течение года при подготовке данных Reported и Quasi-definitive и обычно требуется всего один-два дня, чтобы получить итоговые данные Definitive практически в законченном виде.

Технология обработки, реализованная в программном обеспечении, следует следующим принципам:

1) в качестве исходных данных непрерывных измерений компонентным и скалярным магнитометрами используются исходные файлы, а не какие-либо промежуточные, полученные после некоторых преобразований. Все действия с данными, которые требуется выполнить при обработке, например, отбраковка помех, коррекция меток времени и т.п., определяются функциями и скриптами используемого ПО, а параметры для этих действий записаны в специальные файлы при оперативной обработке и подготовке QD-данных в течение года;

2) обработка непрерывных измерений и подготовка принятых базисных значений разделены. Это значит, что отдельно вычисляются минутные значения вариаций, например,  $dNm$ ,  $dDm$ ,  $dZm$  и  $Fm$ , и отдельно — принятые (Adopted) базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ ,  $F_0$ . Такое разделение позволяет более эффективно вносить изменения, например, при необходимости пересчитать только одни сутки с какими-либо поправками, или получить принятые базисные с другими параметрами сглаживания используемого интерполирующего сплайна. Конечно, перевычисление и базисных, и минутных значений вариаций потребуется, если изменения затрагивают оба процесса, например, если решено ввести температурные поправки;

3) для заполнения пропусков в данных основного компонентного магнитометра используются результаты измерений резервным магнитометром, которые проходят такую же полную обработку, как и данные основного прибора. По сути, мы получаем ещё один независимый ряд данных Definitive. Соответственно, процедура заполнения пропусков основного ряда сводится просто к подстановке соответствующих данных из резервного ряда.

Обработка для всех вариационных магнитометров выполняется в общем выделенном каталоге INTERMAGNET\_DVD.

## 4.1. Вычисление минутных значений

Эти вычисления идентичны тем, что выполняются при подготовке данных Reported или QD-данных, за исключением того, что усредняются не полные значения составляющих, а их вариации. Используется скрипт `fge_cycle_min_var.m`, в котором устанавливаются начальная и конечная даты обработки и организуется цикл вычислений по суткам. Суточная обработка выполняется с помощью скрипта `fge_process_min_var_cycle.m`:

- инициализируются постоянные и параметры;
- считываются исходные данные скалярного магнитометра GSM-90 за предыдущие и текущие сутки, корректируются метки времени, удаляются задокументированные помехи, удаляются отдельные выбросы, превышающие заданное пороговое значение, данные объединяются в один массив (из предыдущих суток выбираются данные только за последние 5 минут);
- считываются исходные данные компонентного вариометра FGE, корректируются метки времени, удаляются задокументированные помехи, удаляются помехи от ионозонда, данные за последние 5 мин предыдущих суток и данные за текущие сутки объединяются, учитывается зависимость Z-составляющей от вариаций горизонтальных компонент, выполняется коррекция секундных данных (учёт постоянного смещения);
- вводится температурная поправка. Эта процедура не использовалась ранее, при подготовке данных Reported и Quasi-definitive, однако для данных Definitive она предусмотрена. Известно, что феррозондовые магнитометры имеют температурную зависимость и что эту зависимость достаточно сложно формализовать, по крайней мере, выражение  $K \cdot (TR - TR_0)$ , где  $K$  – температурный коэффициент,  $TR$  – температура,  $TR_0$  — принятая температура нулевой поправки, во многих случаях оказывается неэффективным (в отличие, например, от температурной зависимости кварцевых вариационных станций). Так, по ориентировочным оценкам, коэффициент  $K$  для Z-канала магнитометра FGE на обсерватории "Паратунка" составляет около  $0.5 \text{ нТл/}^\circ\text{C}$ . Однако реальное применение этой простой линейной зависимости во многих случаях приводило к явно неадекватным результатам: поправка корректно работала при медленных изменениях температуры (сутки) и плохо при более быстрых температурных вариациях. Кроме того, проявлялся эффект гистерезиса, когда при росте температуры и её понижении учёт температурной поправки давал результаты, заметно различающиеся по качеству. Поэтому учёт влияния температуры в постоянном режиме на обсерватории "Паратунка" не выполняется (однако ранее, когда на обсерватории использовалась ЦМВС "Кварц-6", температурная поправка в результатах её измерений учитывалась достаточно эффективно).

Чтобы уменьшить эффект, проводятся мероприятия по улучшению термоизоляции вариационного павильона, что позволяет сглаживать суточные перепады температуры, в том числе и в летнее время, а междусуточные изменения уличной температуры компенсируются частыми определениями базисных значений. Однако при обработке более старых измерений, когда температурный режим в вариационном павильоне был очень нестабильным, меняясь от  $-5^\circ\text{C}$  до  $+25^\circ\text{C}$  в течение года, в случаях резких изменений температуры в течение суток, например, зимой при отключении электроэнергии на несколько часов, возникали заметные быстрые температурные дрейфы магнитных измерений — для их учёта оценивались локальные по времени температурные коэффициенты и вводились поправки;

- корректируются смещения в секундных данных, возникающие, например, при скачках

(используется информация из файла `\ini_parameters\Correction_SecondVal_FGE-GSM.dat`);

- вычисляются минутные значения модуля  $F_m$  (значения в нулевую секунду каждой минуты) и вариаций  $dH_m$ ,  $dD_m$ ,  $dZ_m$  (взвешенные средние, весовые коэффициенты по Гауссу, стандарт INTERMAGNET) и сохраняются в суточных файлах во внутреннем формате системы MATLAB.

Никакого визуального (графического) контроля в процессе вычислений в цикле не ведётся — возможные ошибки будут выявлены только на последующих этапах обработки. При таких вычислениях годовой массив минутных значений будет получен за 10-15 мин или быстрее.

## 4.2. Вычисление принятых (Adopted) базисных значений

В качестве входных данных используются наблюденные базисные значения  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $Z_0$ ,  $F_0$ , сохраняемые после обработки результатов абсолютных наблюдений в файлах `blv_fge.dat` и `dFgrad_Obs_FGE.dat`. Поскольку эти данные уже были проверены при подготовке суточных файлов в статусе Reported и Quasi-definitive, то задача сводится к наиболее оптимальному вычислению принятых базисных и она достаточно близка к той, что ставилась при подготовке QD-данных. Используется скрипт `base_fge_to_blfv200.m`:

- инициализируются параметры, требуемые для обработки;

- из файлов считываются наблюденные базисные значения  $H_{0n}$ ,  $D_{0n}$ ,  $Z_{0n}$ ,  $F_{0n}$ , за весь период абсолютных наблюдений и учитываются личные систематические ошибки наблюдателей (могут быть разные в разные периоды времени);

- из исходных рядов убираются скачки (информация о скачках — в файле `\ini_parameters\base_jumps_FGE_GSM.dat`);

- для основного fDI-магнитометра (код инструмента 28), по наблюденным базисным значениям, маркированных флагом "1", т. е. признанным достоверными, вычисляются среднесуточные значения  $H_{0c}$ ,  $D_{0c}$ ,  $Z_{0c}$ ,  $F_{0c}$ ;

- по  $H_{0c}$ ,  $D_{0c}$ ,  $Z_{0c}$ ,  $F_{0c}$  с помощью сглаживающего сплайна `csaps()` и заданных индивидуально для каждой составляющей параметров сглаживания вычисляются принятые (Adopted) на каждые сутки базисные значения  $H_{0сут}$ ,  $D_{0сут}$ ,  $Z_{0сут}$ ,  $F_{0сут}$ . Эти данные не используются при вычислении полных значений составляющих поля, однако они выводятся в стандартный файл INTERMAGNET для базисных значений, в секцию "Adopted";

- по исходным наблюденным  $H_{0n}$ ,  $D_{0n}$ ,  $Z_{0n}$ ,  $F_{0n}$  с помощью функции `csaps()` вычисляются принятые (Adopted) базисные значения на каждую минуту  $H_{0мин}$ ,  $D_{0мин}$ ,  $Z_{0мин}$ ,  $F_{0мин}$ . Параметры сглаживания используются те же, что и при вычислении суточных принятых базисных;

- восстанавливаются скачки базисных линий — в исходных и принятых значениях;

- средние за сутки наблюденные  $H_{0c}$ ,  $D_{0c}$ ,  $Z_{0c}$ ,  $F_{0c}$  и принятые  $H_{0сут}$ ,  $D_{0сут}$ ,  $Z_{0сут}$ ,  $F_{0сут}$  базисные значения выводятся в стандартный текстовый файл, в формате IBFV2.00 INTERMAGNET Baseline Format (<http://www.intermagnet.org/data-donnee/formats/ibfv200-eng.php>). Последняя колонка в секции "Adopted", представляющая среднесуточное значение

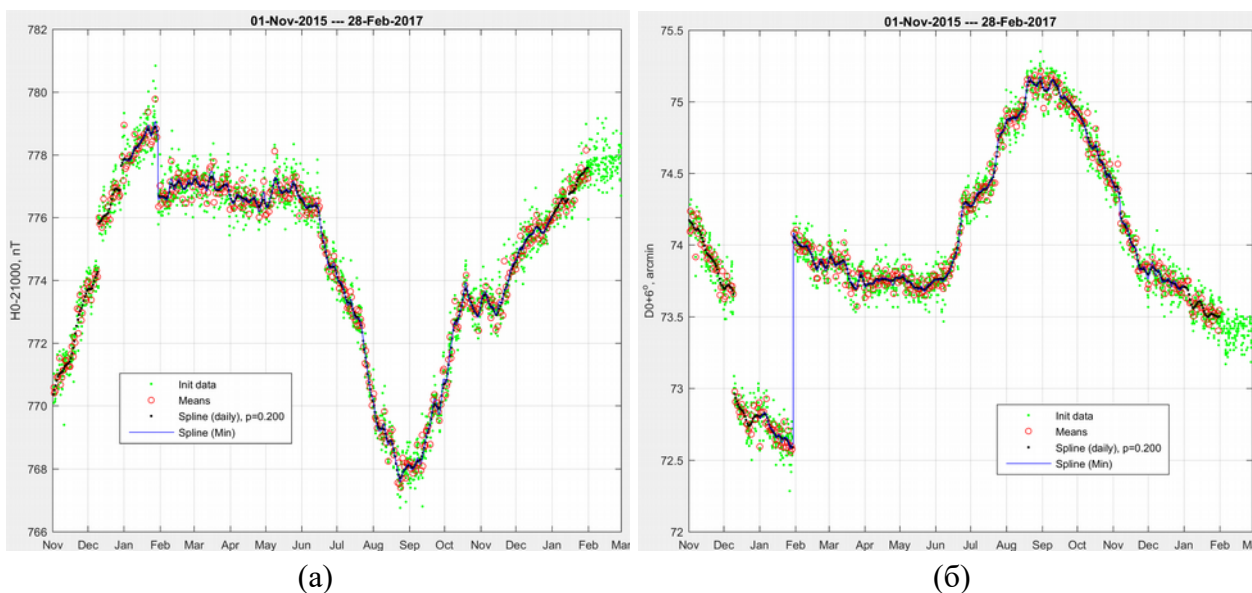
$\Delta F = F_v - F_s$ , временно заполняется кодом "88888", поскольку реальные данные будут вставлены позже, после получения минутных значений полного вектора и модуля. В заголовке файла также записывается временная строка

"HDZF ННННН FFFFFF PET 2016"

где "ННННН" и "FFFFF" – поля для записи средних значений Н и F за год, которые будут заполнены после получения среднегодовых данных за 2016 г. Минутные принятые базисные значения записываются в файл **BLV\_FGE\_Definitive\_Minute.mat** во внутреннем формате MATLAB;

- полученные результаты выводятся на графики (см. рис. 40) — показаны исходные наблюдаемые базисные, средние за сутки, принятые на каждые сутки и принятые на каждую минуту. Поскольку процедура аппроксимации сглаживающим сплайном применяется ко всему ряду базисных, то не возникает проблем на границах года, когда могут наблюдаться нестыковки с предыдущим годом, и эти нестыковки обнаруживаются только на стадии итогового просмотра, например, с помощью INTERMAGNET Data Viewer. На графиках видны скачки в 2016 г. — 30 января из-за сильного землетрясения и 7 ноября из-за смены осветительной лампы, расположенной вблизи датчика GSM-90.

На месячных фрагментах данных  $H_0$  и  $F_0$  (рис. 40(д,е) видно, что минутные и суточные принятые базисные ведут себя по разному для  $H_0$  и  $F_0$ :  $H_{0min}$  сильнее меняется, чем  $H_{0сут}$ , а  $F_{0min}$  и  $F_{0сут}$  совпадают. Это связано с тем, что суточные принятые базисные считаются по средним за сутки наблюдаемым значениям, а минутные — по исходным. Исходные наблюдаемые базисные  $F_0$  сразу даются как средние за сутки, поэтому при неизменном параметре сглаживания сплайн для минутных и суточных значений один и тот же, только представлен с разной дискретностью по времени.



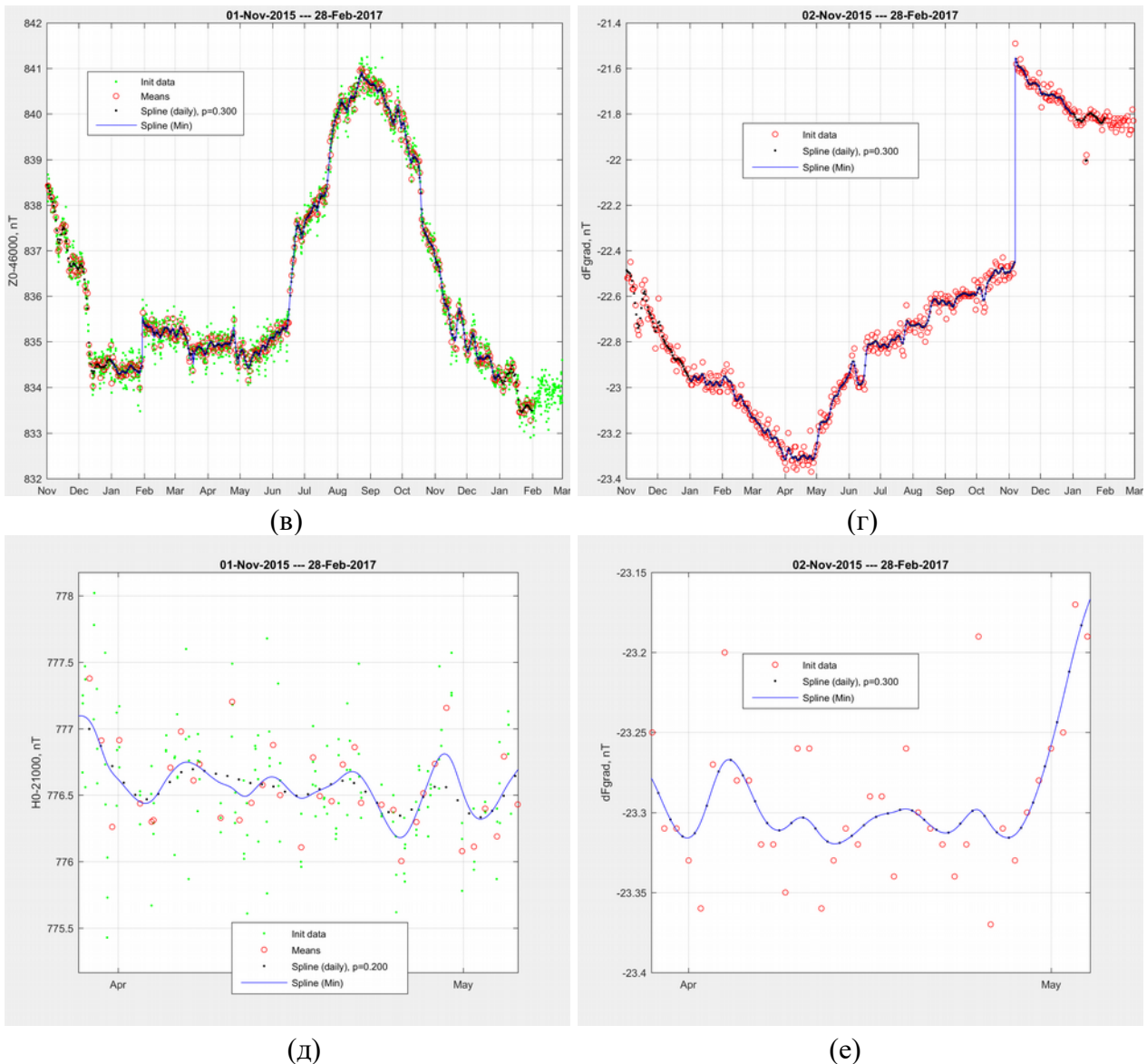


Рис. 40. Базисные значения магнитометров FGE и GSM-90, используемые при подготовке данных Definitive за 2016 г. "Init data" – наблюденные (исходные) базисные значения, "Means" – средние за сутки (для F0 "Init data" и "Means" совпадают), "Spline (daily)" – аппроксимация сглаживающим сплайном с параметром  $p$  на каждые сутки, "Spline(Min)" аппроксимация на каждую минуту. Панели (д), (е) — фрагменты графиков на панелях (а) и (г).

Задача магнитолога на этом этапе — ещё раз оценить качество исходных базисных значений и, при необходимости, для недостоверных данных установить флаг в исходном файле в значение "0" и повторить вычисления. Также важно убедиться в оптимальности принятой глубины сглаживания сплайном — возможно, потребуется получить более или менее гладкие кривые для принятых базисных значений. Но окончательная оценка выбора будет сделана после вычисления полных минутных значений составляющих и сравнения  $F_v$  с  $F_s$ . Как пример: в конце октября — в начале ноября в  $H_0$  и  $Z_0$  наблюдаются колебания размахом до 1-2 нТл. Если это ошибки абсолютных наблюдений, например, из-за смен наблюдателей с личными систематическими погрешностями, то необходимо более сильное сглаживание, чтобы уменьшить эффект ошибки наблюдателя. Если это объективное колебание базисных линий, например, из-за температуры, то желательно, чтобы принятые базисные более строго отслеживали эти вариации  $H_0$  и  $Z_0$ . Возможно, дополнительная информация появится в конце цикла полной обработки, когда можно будет сравнить  $F_v$  и  $F_s$  и по колебаниям



разности сделать вывод об оптимальности выбора степени сглаживания сплайна.

Необходимо отметить, что процесс подготовки данных Definitive во много итерационный, в особенности это относится к получению принятых базисных значений, правильность и/или оптимальность которых можно более-менее достоверно оценить после получения итоговых минутных данных за весь год, по сути — в конце цикла обработки. Если итоговые данные получаются неоптимально, то, вероятно, придётся пересчитывать принятые базисные с новыми параметрами аппроксимации и далее пройти весь цикл. Однако при этом нет необходимости перевычислять минутные значения вариаций. Подобные итерации возникают и при обнаружении при итоговом просмотре данных не удалённых ранее помех — после удаления помехи весь цикл вычислений повторяется снова (но средние минутные значения вариаций вычисляются только для конкретных суток с помехой).

### 4.3. Вычисление полных значений составляющих поля

На данном этапе по минутным значениям вариаций  $dH_m$ ,  $dD_m$ ,  $dZ_m$ ,  $F_m$  и минутным базисным  $H_{0\text{мин}}$ ,  $D_{0\text{мин}}$ ,  $Z_{0\text{мин}}$ ,  $F_{0\text{мин}}$  вычисляются полные значения составляющих вектора поля и его модуля. Используется скрипт `fge_control_all_minblv.m`:

- инициализируются постоянные;

- в цикле по суткам за год из суточных файлов минутных значений вариаций собирается годовой файл;

- считывается файл минутных базисных значений (формат MATLAB) и вычисляется полный вектор по измерениям компонентного магнитометра FGE и модуль вектора по измерениям скалярного магнитометра GSM-90

$$\begin{aligned} H &= \sqrt{(H_{0\text{мин}} + dH_m)^2 + dD_m^2}, \\ D &= D_{0\text{мин}} + \text{atan}(dD_m/H_m), \\ Z &= Z_{0\text{мин}} + dZ_m, \\ F &= F_{0\text{мин}} + F_m, \\ F_v &= \sqrt{H^2 + Z^2}. \end{aligned}$$

Выводится сообщение о количестве пропущенных (заполненных символами NaN) значениях по каждой составляющей и модулю (в 2016 г. - 1065, 1065, 1065 и 637, соответственно), а также рисуется годовой график разностей  $F_v - F_s$  минутных значений (рис. 41).

Можно в интерактивном режиме работы с окном Figure посмотреть детали графиков. Полученные минутные значения сохраняются в специальном годовом файле в формате MATLAB – `save one_min_2016_01_12_fge.mat T H D Z F`, здесь T – сериальная дата.

### 4.4. Запись минутных данных в месячные бинарные файлы

Описание формата IAF (INTERMAGNET Archive Format) месячных бинарных файлов даётся на странице <http://intermagnet.org/data-donnee/formats/iaf-eng.php> сайта INTERMAGNET. Процедура записи достаточно формальная, возможно, за исключением вычисления средних значений за час и сутки.



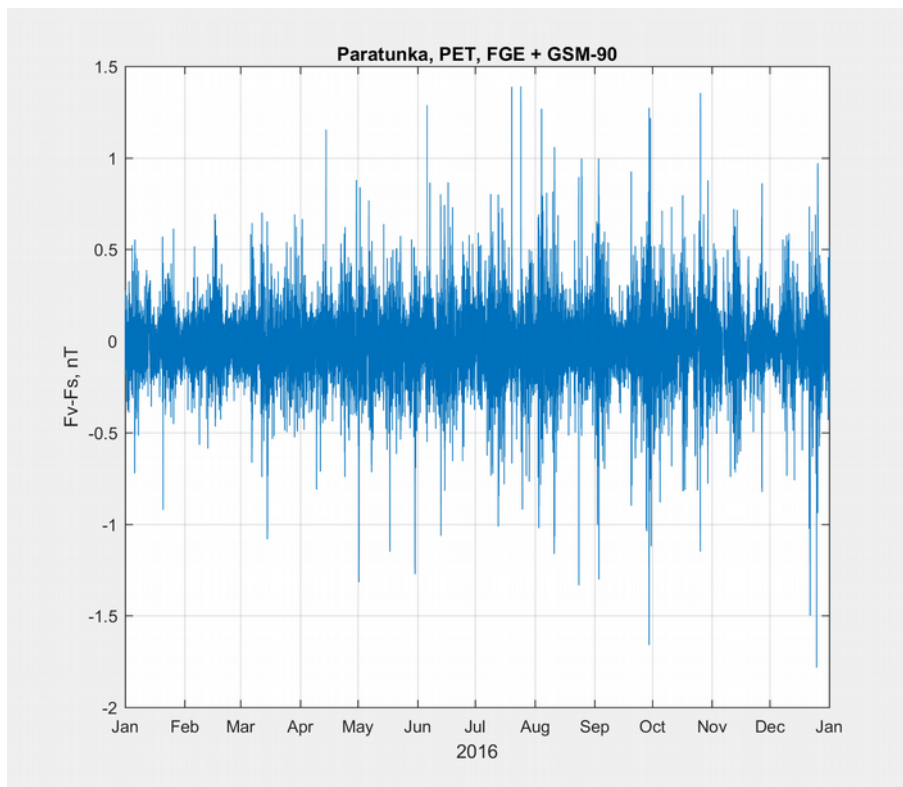


Рис. 41. Разности минутных значений  $F_{var}(FGE)$  и  $F_{scal}(GSM90)$ , полученные в 2016 г. на обсерватории "Паратунка" (статус данных — Definitive).

В память MATLAB загружается годовой файл с минутными значениями T, H, D, Z, F (см. выше). Далее используется функция `cdrom_bin_write_fge_gsm(T,H,D,Z,F)`, в которой последовательно выполняются следующие действия:

- в зависимости от года обработки определяется версия формата IAF (для данных с 2010 г. и старше версия 2.1 и устанавливается код версии 3);

- заполняются постоянные значения и параметры заголовка для суточных блоков месячного файла:

```

Year=year_ini;      % year_ini определяется годом в первом элементе сериальной даты T(1)
Daynum=1;
Code='PET';        % код обсерватории
CoLat=90-52.971;   % коширота
Lon=158.248;       % долгота
Elevation=50;      % высота над уровнем моря
if IAF_ver<2,
    Orientation='XYZF'; % составляющие, записанные в файл
else
    Orientation='XYZG'; % G = Fv-Fs
end
Organization='IKIR'; % институт
switch Orientation(1:3),
    case 'XYZ'
        D_convers=10000; % множитель для графического отображения данных
    case 'HDZ'

```

```

    Hmean=21659; % year=2012 (All minute data)
    D_convers=round(Hmean/3438*10000);
otherwise
    D_convers=10000;
end
Quality='IMAG'; % используемый стандарт
Instrum=' LC'; % тип компонентного магнитометра
K9=450; % значение K9 для вычисления K-индексов
Sampling=1000; % периодичность измерений в мс
Sensor_orientation='HDZF'; % ориентация датчиков вариометра
[yyy,mmm,ddd,hh,mm,ss]=datevec(date);
    Publ_Date=(yyy-2000)*100+mmm; % дата подготовки файла

```

- элементы H, D, Z конвертируются в X, Y, Z;

- формируется элемент G для записи в файл: для версии IAF-файла 2009 г. в качестве G используются Fs, в более поздних версиях  $G = \Delta F = F_v - F_s$ , если имеются измерения Fv. При отсутствии Fv и наличии Fs,  $G = -F_s$ .

Далее в цикле по месяцам открывается бинарный месячный файл и в цикле по суткам выполняется запись:

- записывается заголовок (см. описание выше);

- записывается 1440 значений  $X \times 10$ ,  $Y \times 10$ ,  $Z \times 10$ ,  $G \times 10$  в целочисленном виде. При отсутствии данных (символ NaN) записывается значение 999999 (если измерения скалярным магнитометром не выполняются, то все  $G=888888$ );

- с помощью функции **mean\_with\_gaps()** вычисляются среднечасовые значения Xh, Yh и Zh (используются минутные данные с минуты 00 до 59) и среднесуточные Xd, Yd и Zd (по минутам с 0 по 1439). Здесь необходимо остановиться подробнее, т. к. вопрос с вычислением средних значений не является тривиальным — см. Отступление IX;

- формируются поля для K-индексов и резервные.

Протокол работы функции показан ниже:

```

>> cdrom_bin_write_fge_gsm(T,H,D,Z,F)
PET16Jan.bin
PET16Feb.bin
PET16Mar.bin
PET16Apr.bin
PET16May.bin
PET16Jun.bin
PET16Jul.bin
PET16Aug.bin
PET16Sep.bin
PET16Oct.bin
PET16Nov.bin
PET16Dec.bin

```

В текущем рабочем каталоге создаются 12 месячных бинарных файлов

#### 4.5. Запись в месячные бинарные файлы значений локальных K-индексов

Локальные трёхчасовые К-индексы вычисляются с помощью программы KASm.exe, использующей алгоритм адаптивного сглаживания и рекомендованной INTERMAGNET в качестве стандартного средства для получения К-индексов. Вызов программы в консоли с помощью дополнительных параметров (ниже — пример для 2016 г.)

KASm PET:01Jan2016:366 450 ху pet2016 -b -u

позволяет выполнить вычисления, используя минутные значения X,Y из бинарных файлов и записать полученные К-индексы в эти же бинарные файлы. Кроме записи в месячные файлы, может быть организован вывод К-индексов в специальный текстовый файл, имя которого задаётся в параметрах командной строки. В примере выше — это имя файла pet2016.dka, где расширение "dka" формируется автоматически. Файл имеет вид:

| PET  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|--|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| K - Index values for 2016 ( K9-limit = 450nT ) |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| DA-MON-YR                                      | DAY # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | SK |
| 01-JAN-16                                      | 001   | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 20 |
| 02-JAN-16                                      | 002   | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 13 |
| 03-JAN-16                                      | 003   | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 11 |
| 04-JAN-16                                      | 004   | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 8  |
| 29-DEC-16                                      | 364   | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 8  |
| 30-DEC-16                                      | 365   | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 6  |
| 31-DEC-16                                      | 366   | 0 | 1 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 1 | 18 |

#### 4.6. Контроль бинарных (IAF) файлов

Имеется две возможности выполнить проверку полученных бинарных файлов: используя средства обсуждаемого ПО на MATLAB и стандартные программы, рекомендуемые INTERMAGNET, например, INTERMAGNET Data Viewer. При этом не стоит задача выбора — эти методы проверки прекрасно дополняют друг друга.

Для работы с IAF-файлами их необходимо скопировать в подкаталог \CD\OBS\YEAR, где OBS — код обсерватории, YEAR — год. Далее используется скрипт для их считывания в память MATLAB — `cdrom_bin_read_any.m`, после запуска которого запрашивается год и начальный месяц, количество месяцев и код обсерватории:

```
>> cdrom_bin_read_any
Начальный год и месяц "YYYY MM"? ... 2016 01
Количество месяцев? ... 12
Код станции "CCC"? ... pet
CD\pet\2016\pet16Jan.bin
CD\pet\2016\pet16Feb.bin
CD\pet\2016\pet16Mar.bin
CD\pet\2016\pet16Apr.bin
CD\pet\2016\pet16May.bin
CD\pet\2016\pet16Jun.bin
CD\pet\2016\pet16Jul.bin
CD\pet\2016\pet16Aug.bin
CD\pet\2016\pet16Sep.bin
CD\pet\2016\pet16Oct.bin
CD\pet\2016\pet16Nov.bin
CD\pet\2016\pet16Dec.bin

Измеряемые компоненты - XYZG
----- Пропущено минутных данных за этот период:
      16      16      16      150
```

Количество пропущенных минутных данных отличается от ранее упомянутых, т. к. в данном

случае считывались файлы, в которых пропуски уже заполнены (см. далее).

После считывания данные выводятся в виде графиков (см. рис. 42). Достоинство этих графиков, по сравнению с теми, что отображаются Data Viewer, в том, что они показывают годовой массив данных всех трёх типов (минутные, часовые и суточные) одновременно, и имеется возможность выделять и изучать в деталях любой фрагмент. Можно также проконтролировать информацию в заголовке

```
>> head
head =
  struct with fields:

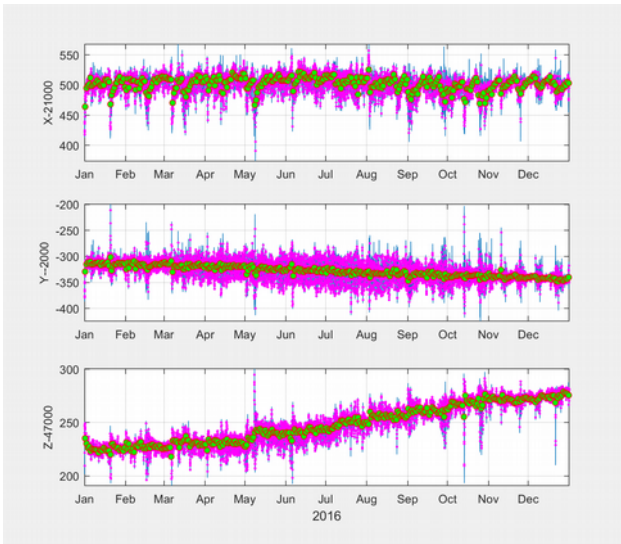
      ObsCode: 'PET'
      Year: 2016
      DayNum: 366
      CoLatitude: 37.0290
      Longitude: 158.2480
      Elevation: 50
      Orientation: 'XYZG'
      Organization: 'IKIR'
      DConversion: 10000
      DataQuality: 'IMAG'
      Instrumentation: 'LC'
      K9: 450
      Sampling: 1000
      Sensor_Orientation: 'HDZF'
      Publ_Date: '|# '
      IAF_ver: 3
```

На рис. 43 в качестве примера показаны некоторые графики, получаемые при просмотре данных Definitive с помощью INTERMAGNET Data Viewer (годовой ряд суточных значений и минутные данные за одни сутки). На графике за 29.09.2016 г. (рис. 43б) видны сильные колебания  $\Delta F$  около 10UT, которые по времени совпадают с резкими вариациями поля, т. е. вызваны различием в методах получения минутных значений  $F_v$  (усреднённые) и  $F_s$  (мгновенные). Этим объясняются (детализируется картина) выбросы в  $\Delta F$  и на рис. 42в.

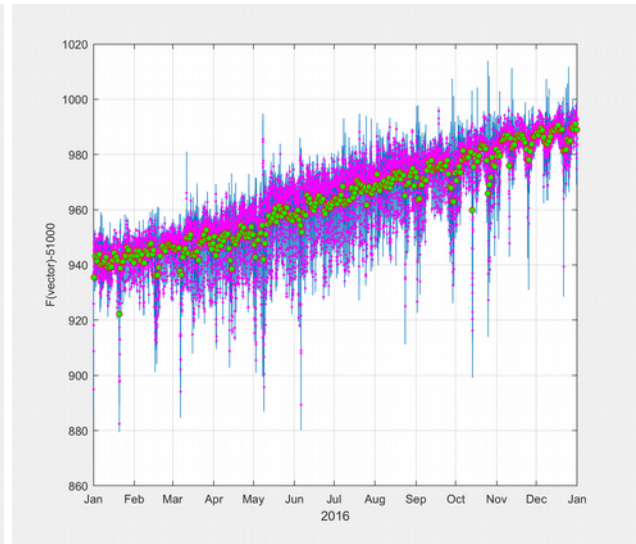
На этом этапе по общей картине за год магнитолог должен убедиться в отсутствии необъяснимых сильных выбросов, проверить, что заголовки и К-индексы записаны в IAF-файлы корректно и т. п. Детальная посуточная проверка выполняется с помощью Data Viewer. Ещё одна проверка структуры и некоторых параметров в бинарных файлах выполняется с помощью консольного приложения check1min.exe Яна Реды.

#### 4.7. Вычисление среднегодовых значений поля

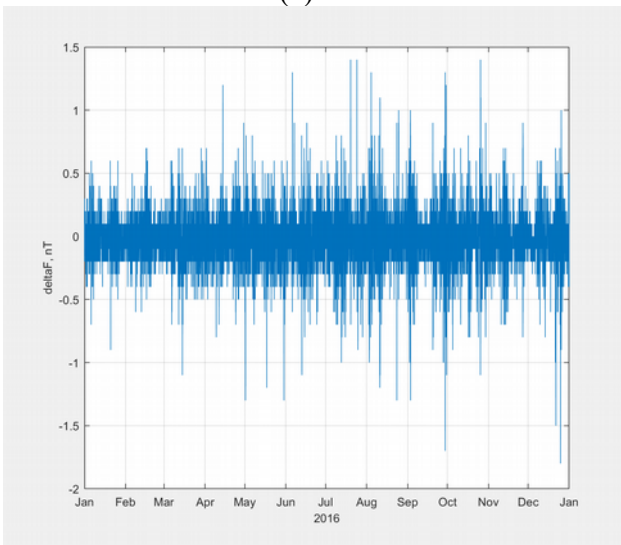
Предоставление информации о медленных изменениях магнитного поля Земли на характерных временах от года и более является одной из основных задач сети магнитных обсерваторий. Задача непростая, т. к. необходимо обеспечивать стабильность, однородность и достоверность измерений в течение десятилетий, в условиях возможных изменений инфраструктуры обсерватории (павильоны, постаменты, вспомогательные объекты), используемых магнитометров и технологий наблюдений, изменений в окружении обсерватории и др.



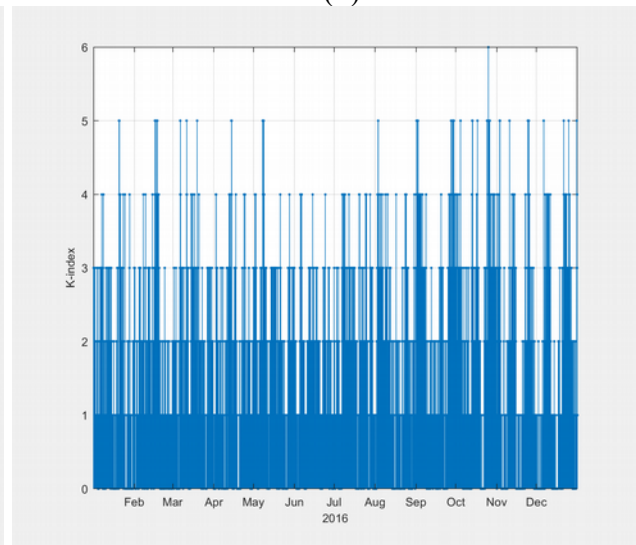
(a)



(б)

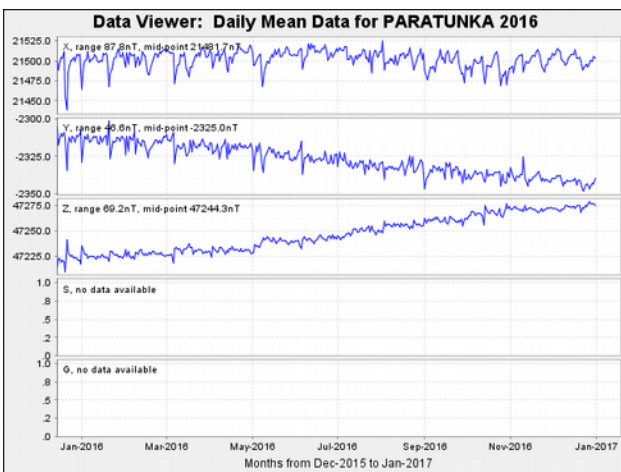


(в)

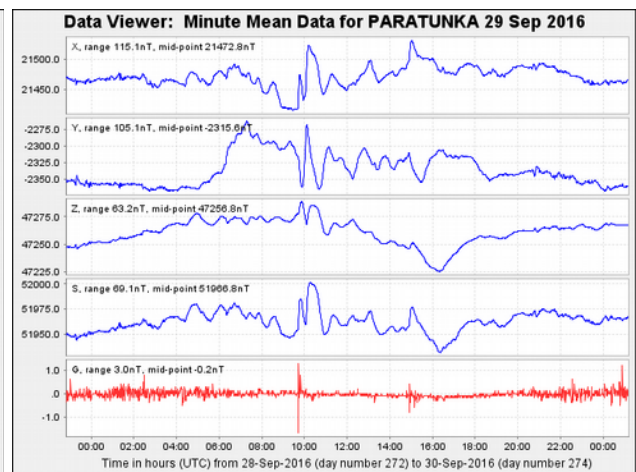


(г)

Рис. 42. Графическое отображение данных, записанных в IAF-файлы (бинарные) — обсерватория РЕТ, 2016 г. Непрерывная кривая — минутные значения, символ "." - часовые, символ "o" — суточные. (а) — X,Y,Z-данные; (б) — модуль Fv, вычисленный по X,Y,Z; (в) —  $\Delta F = F_v - F_s$ , минутные значения непосредственно из бинарных файлов; (г) — трёхчасовые K-индексы.



(a)



(б)

Рис. 43. Пример графиков при просмотре данных Definitive с помощью INTERMAGNET Data Viewer.

Среднегодовые значения элементов магнитного поля заносятся в текстовый файл специального формата, который подробно описан на сайте INTERMAGNET <http://www.intermagnet.org/data-donnee/formats/iyfv101-eng.php>. В файле содержится информация о значениях всех элементов вектора магнитного поля, при этом только некоторые определяются по реальным измерениям, например, по минутным данным X, Y, Z, а остальные вычисляются по этим значениям, т. е. любые преобразования должны давать согласованные результаты. Информация в файле собрана в блоки: заголовок, среднегодовые значения и примечания. При этом блок данных включает секции значений, вычисленных как по всем данным за год, так и за выбранные сутки — по данным только в Международные спокойные дни (Quiet days - QD) и только в Международные возмущённые дни (Disturbed days – DD). Списки таких суток публикуются, например, Центром Гельмгольца — Исследовательским центром по геонаукам в Потсдаме <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/> в виде таблиц, подобных приведённой ниже для 2017 г.

| Month    | Quietest Days |    |    |    |    |    |     |     |     |     | Most Disturbed Days |     |     |     |     |
|----------|---------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|-----|
|          | Q1            | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7  | Q8  | Q9  | Q10 | D1                  | D2  | D3  | D4  | D5  |
| Jan 2017 | 16            | 24 | 17 | 14 | 13 | 23 | 12  | 15  | 25K | 2   | 31                  | 27  | 7   | 5*  | 8*  |
| Feb 2017 | 14            | 26 | 15 | 12 | 8  | 11 | 21  | 13  | 25K | 9   | 1                   | 2   | 17* | 3*  | 24* |
| Mar 2017 | 20            | 19 | 18 | 13 | 17 | 25 | 26  | 14  | 16  | 24  | 27                  | 1   | 2   | 28  | 31  |
| Apr 2017 | 16            | 17 | 3  | 13 | 10 | 30 | 28  | 12K | 29  | 18K | 22                  | 23  | 20  | 4*  | 24* |
| May 2017 | 26            | 25 | 3  | 24 | 13 | 31 | 6   | 2   | 5K  | 1   | 28                  | 20  | 19* | 15* | 27* |
| Jun 2017 | 4             | 20 | 10 | 8  | 30 | 15 | 21  | 28  | 9   | 2   | 16                  | 17* | 11* | 18* | 25* |
| Jul 2017 | 5             | 14 | 8  | 31 | 15 | 30 | 19  | 13  | 29  | 12  | 16                  | 17  | 9   | 2*  | 22* |
| Aug 2017 | 28            | 15 | 26 | 9  | 2  | 30 | 8   | 25  | 14  | 10  | 31                  | 19  | 17  | 23  | 20  |
| Sep 2017 | 26            | 9  | 25 | 23 | 22 | 21 | 10K | 24  | 3A  | 19A | 8                   | 28  | 27  | 15  | 7   |
| Oct 2017 | 30            | 9  | 29 | 31 | 10 | 8  | 7   | 27  | 23  | 18  | 13                  | 14  | 11  | 12  | 15  |
| Nov 2017 | 6             | 5  | 26 | 1  | 4  | 29 | 19  | 27  | 17  | 12  | 8                   | 7   | 21  | 10  | 16* |
| Dec 2017 | 3             | 22 | 21 | 10 | 15 | 16 | 30  | 31  | 2   | 9   | 5                   | 17  | 18* | 6*  | 12* |

При вычислении среднегодовых данных обсуждаемым ПО сначала необходимо подготовить информацию о Q- и D-днях. Для этого с вышеуказанного сайта берутся последние данные и вставляются в пополняемый файл qd20000x.dat, однако без заголовков и разделительных строк. Затем с помощью скрипта **QD\_days.m** формируется файл **QD\_2000\_current.mat** формата MATLAB с сериальными датами дважды по пять Q-дней и пяти D-дней (такой несколько сложный подход во многом имеет исторические корни).

Затем с помощью скрипта **cdrom\_bin\_read\_any.m** считываются 12 месячных IAF-файлов и запускается скрипт **yearmean\_cd.m**, который вычисляет минутные значения всех элементов поля, т. е. дополнительно к X, Y, Z, F-набору также H, D и I. Затем вычисляются средние за год значения по всем суткам, по Q- и D-дням. Информация выводится в виде трёх строк

```
2016.500 -06 10.8 65 24.2 21628 21502 -2328 47248 51963 A HDZF 3
2016.500 -06 10.4 65 23.8 21635 21509 -2326 47247 51965 Q HDZF 3
2016.500 -06 11.4 65 24.9 21617 21491 -2331 47247 51958 D HDZF 3
```

которыми пополняются соответствующие секции в файле yearmean.pet.

Контроль файла среднегодовых значений выполняется с помощью функции **yearmean\_read\_fun()**, в которой задаются имя файла, тип данных (A,Q,D) и флаги, определяющие необходимость графического представления данных и необходимость учёта скачков. Пример вызова:



```
[Year,D,I,H,X,Y,Z,F]=yearmean_read_fun('d:\magYYYY\mag2016\PET\yearmean.pet','A',1,1);
```

Результаты в виде графиков показаны на рис. 44. Контроль файлов среднегодовых значений выполняется также в INTERMAGNET Data Viewer и консольным приложением check1min.exe.

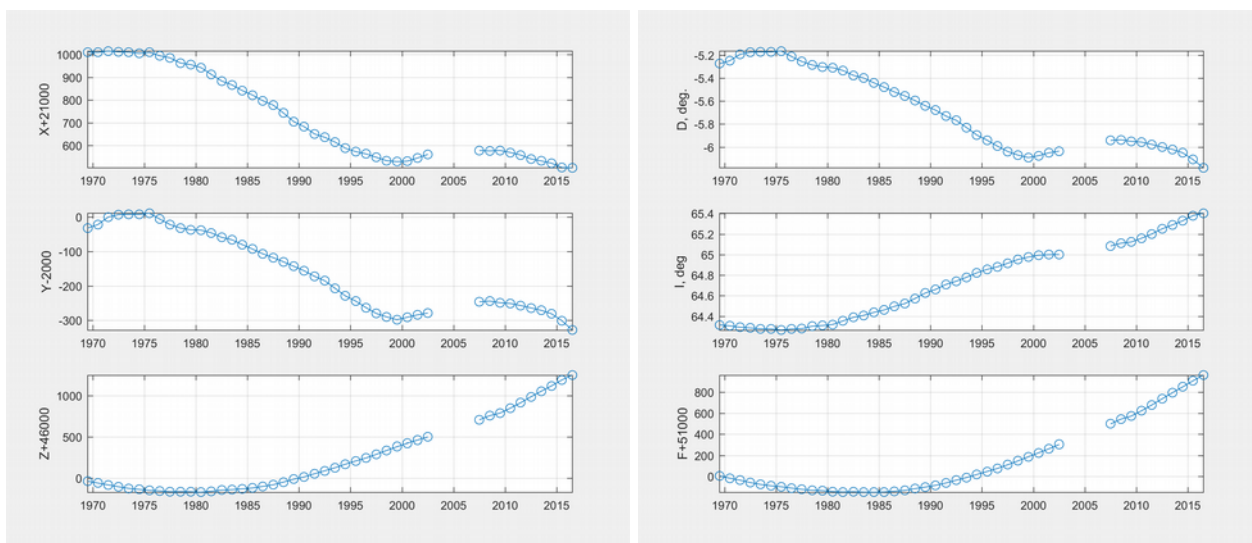


Рис. 44. Среднегодовые значения магнитного поля, полученные по измерениям на обсерватории "Паратунка".

#### 4.8. Окончательная подготовка и контроль файла базисных значений

Как отмечалось в разд.2, в котором описано создание файла базисных значений, заголовок файла и последняя колонка в секции "Adopted" заполнены временными значениями. Так, в заголовке, имеющем вид "HDZF НННН FFFF PET 2016", поле "НННН" заменяется средним значением H-составляющей за год "21628", а поле "FFFF" — на среднее значение модуля F "61963".

Секция "Adopted" имеет вид

```
*
001 21777.87 -287.21 46834.54 -22.97 888.00 c
002 21777.85 -287.20 46834.52 -22.97 888.00 c
003 21777.83 -287.19 46834.49 -22.97 888.00 c
*
364 21775.88 -286.30 46834.24 -21.79 888.00 c
365 21775.95 -286.29 46834.26 -21.80 888.00 c
366 21776.01 -286.29 46834.24 -21.80 888.00 c
*
```

где символ "\*" является разделителем секций. Столбцы представляют последовательный номер суток в году, базисные значения H0(нТл), D0(угл.мин.), Z0(нТл), F0(нТл), deltaF и флаг скачка ("c" – continuous, данные без скачка, "d" – discontinuity, был скачок). Флаг скачка может использоваться программами для графического отображения базисных, чтобы убрать большие скачки для лучшего масштабирования.

Величина deltaF в файле базисных вычисляется как среднее по минутным значениям deltdF для каждых суток. При отсутствии минутных deltaF устанавливается величина "999". В отношении суточного значения deltaF в файлах базисных существуют некоторые разночтения — в некоторых случаях deltaF предлагается вычислять как разность среднесуточных Fv и Fs (при наличии пропусков эта процедура не будет идентична используемой в нашем ПО).



Для заполнения "888.00" в поле deltaF минутные данные из бинарных файлов считываются в память MATLAB (скрипт **cdrom\_bin\_read\_any.m**). Затем запускается скрипт **df\_daily\_to\_file.m**, в котором по минутным deltaF вычисляются средние за сутки (независимо от количества пропусков, при полностью отсутствующих данных устанавливается значение "999.00"). Полученные результаты выводятся в текстовый файл в виде:

```
-0.00 с 001
-0.04 с 002
-0.00 с 003

-0.02 с 364
-0.05 с 365
-0.01 с 366
```

и столбцом с deltaF необходимо просто заменить колонку с "888.00". Колонка с номерами суток необходима для удобства — чтобы ориентироваться при редактировании файлов.

Последние изменения в файле базисных значений — заполнение секции "Комментарии". После формирования файла там обычно записаны значения параметров сглаживания, которые использовались при вызове функции **csaps()**. Эта секция является очень важной, поскольку именно в ней можно сделать записи о проблемах при измерениях и обработке в течение года, особенностях вычислений и т. п. Например, в этой секции в файле PET2016.blv обсерватории "Паратунка" за 2016 год записано:

\*

1) Absolute measurements are performed 5-6 times a week by different observers. The daily mean values of baselines were calculated by 3-6 individual observations of D,I,F. The Adopted values were obtained using cubic smoothing spline with smoothing parameter equal to 0.2-0.3. Jumps in Observed baselines were removed before approximation and restore in Adopted values.

2) In order to remove the jumps of total field components at boundaries of the days during fast changes of baselines due to temperature effects, the Adopted baselines values were calculated for every minutes of 2016

3) Observers:

|  |     |
|--|-----|
| Anastasiya F. Raykevich (regular)      | 19% |
| Irina N. Khomutova (regular)           | 19% |
| Olga S. Bogunova (regular)             | 18% |
| Sergey Y. Khomutov (occasionally)      | 22% |
| Ilkhambek Y. Babakhanov (occasionally) | 22% |

The total number of DI-measurements on the main fDI is 1674.

4) Jumps in baselines at 30 January (DoY 030) is the result of earthquake effect to suspended sensors of variometer FGE.

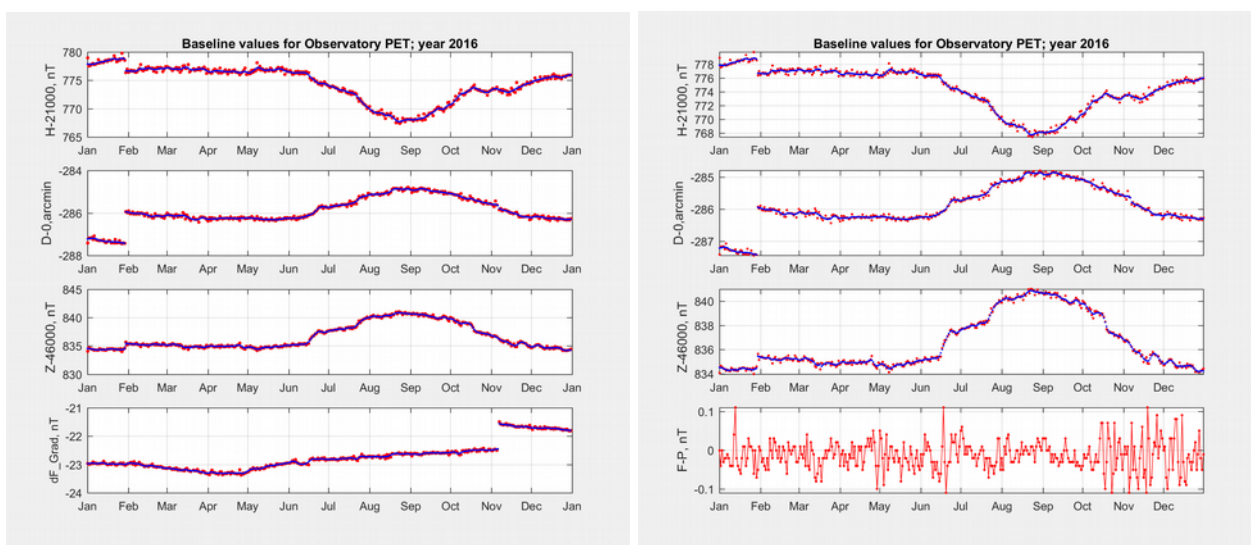
5) Slow changes of baselines from June to November are mainly related to the change of regulated temperature in the variation pavillion from winter to summer level.

На наш взгляд, важно отметить вклад каждого наблюдателя в работу по определению базисных значений.

Итоговый контроль информации в файле базисных значений выполняется с помощью функции **blv\_control\_fun()**. Например, вызов функции

```
[To,Co,Ta,Ca,dF,comp]=blv_control_fun(2016,'pet','d:\magYYYY\mag2016\PET\',1);
```

считывает матрицу  $C_0=[D_0 \ H_0 \ Z_0 \ F_0]$  наблюдаемых базисных, матрицу  $C_a$  принятых базисных, вектор  $dF=\Delta F$  и список составляющих  $comp$ , для которых получены базисные значения. Также рисуются два графика (см. рис. 45).



(a)

(б)

**Рис. 45.** Пример графического вывода данных из файла базисных значений магнитометров FGE и GSM-90 обсерватории "Паратунка" (2016 г.). Графики  $H_0, D_0, Z_0$  на левой и правой панелях идентичны, но на правой панели они масштабированы так, чтобы полностью заполнить область для рисования. Красные точки — средние за сутки наблюдаемые значения, синие точки — вычисленные на каждые сутки принятые базисные. Нижний график на левой панели — базисное значение  $F_0$  скалярного магнитометра GSM-90, на правой панели — суточные значения  $\Delta F = F_v - F_s$ .

Визуализация базисных значений (графически и в виде таблиц) также может быть выполнена с помощью INTERMAGNET Data Viewer, контроль формата — с помощью консольного приложения `check1min.exe`.

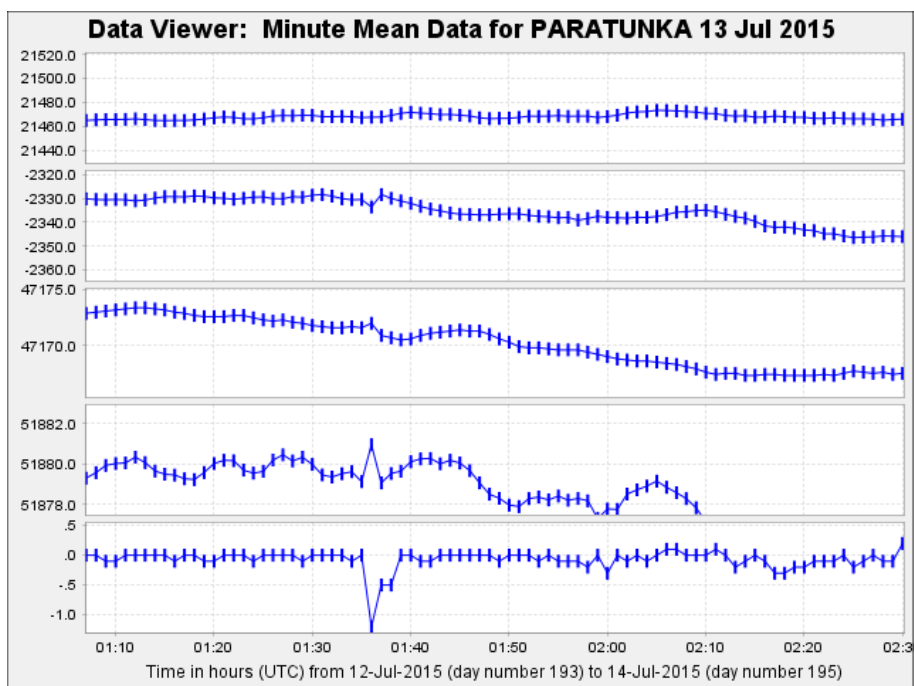
На этом полный цикл (итерация) подготовки данных в статусе Definitive завершён. Конечно, процедуры по пп. 5-8 могут быть сделаны и после окончательного решения о необходимости корректировки минутных данных.

#### 4.9. Детальная проверка данных, корректировка при необходимости

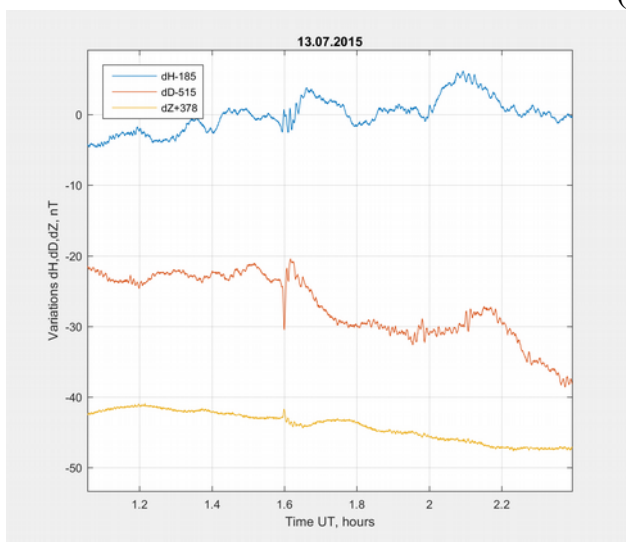
После получения месячных IAF-файлов (п.4) или после полного цикла обработки необходимо выполнить углублённую проверку. Используется INTERMAGNET Data Viewer, в котором сутки за сутками просматриваются данные, как в обычном режиме, так и в режиме просмотра последовательных разностей ("Plot Differences"). При отсутствии непрерывно записывающего скалярного магнитометра последний режим является, по сути, единственной возможностью находить скачки и выбросы небольшой амплитуды. При обнаружении данных, которые кажутся недостоверными, необходимо выполнить сохранение графика с проблемным участком (желательно) и провести анализ причин проблемы:

- посмотреть в журнале оперативной обработки записи за проверяемые сутки, возможно, там есть указание на возможные причины проблемы;

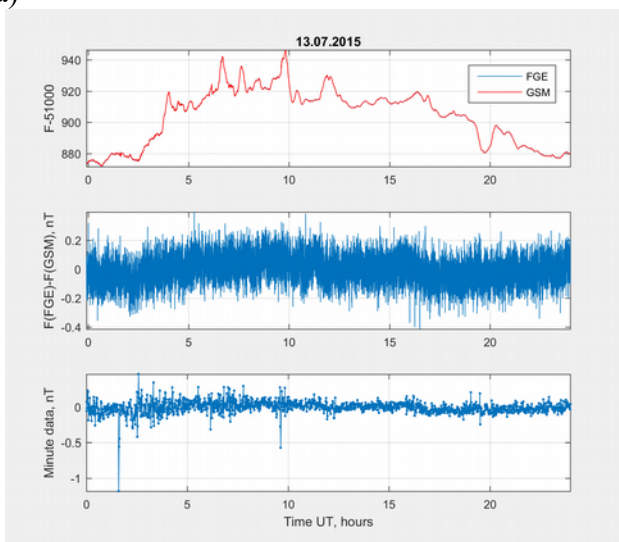
- выполнить стандартную обработку данных FGE (и GSM-90) с помощью скриптов `fge_process.m` и `fge_process_min.m` и посмотреть на результаты последнего — возникает ли рассматриваемая проблема. Если возникает, по возможности, устранить её, внося изменения в параметры обработки (в файлах с информацией об удалении данных, о коррекции данных и коррекции времени измерений и др.). На рис. 46а показан фрагмент графика при просмотре Definitive минутных данных за 13.07.2015 г. с помощью Data Viewer, на котором выброс  $\Delta F$  амплитудой более 1 нТл мог быть следствием помехи в исходных данных.



(a)



(б)

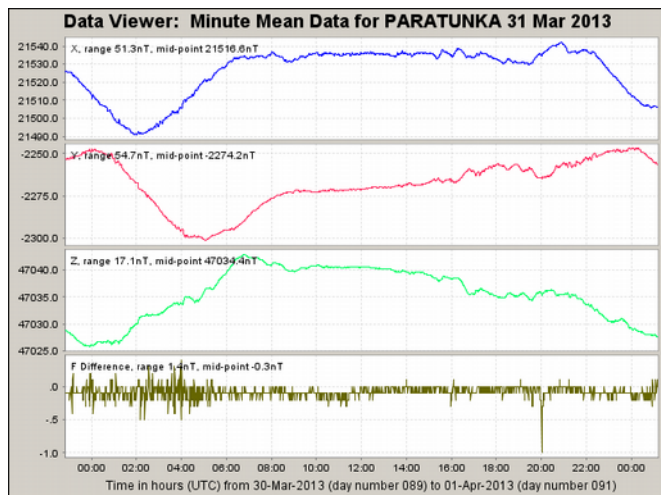


(в)

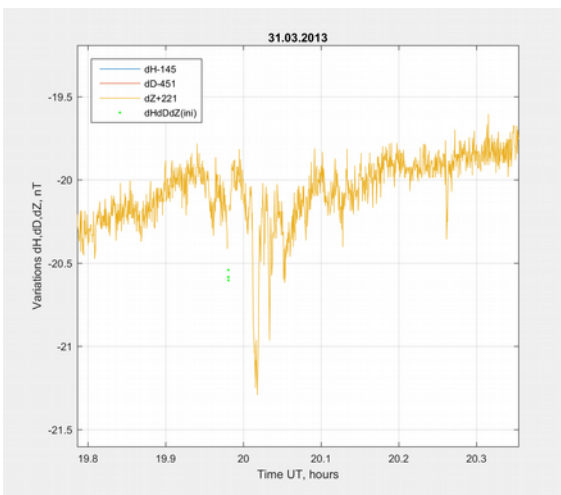
Рис. 46. Пример проверки минутных данных. (а) — график Data Viewer за 13.07.2015 г. (выделен фрагмент с участком записи, который может быть недостоверным — около 01:36 UT), показаны элементы X,Y,Z,Fs и  $\Delta F$ . (б) и (в) — графики при просмотре данных с помощью скриптов `fge_process.m` и `fge_process_min.m`.

Обработка этих суток стандартными скриптами (рис. 46б,в) показывает, что в магнитном

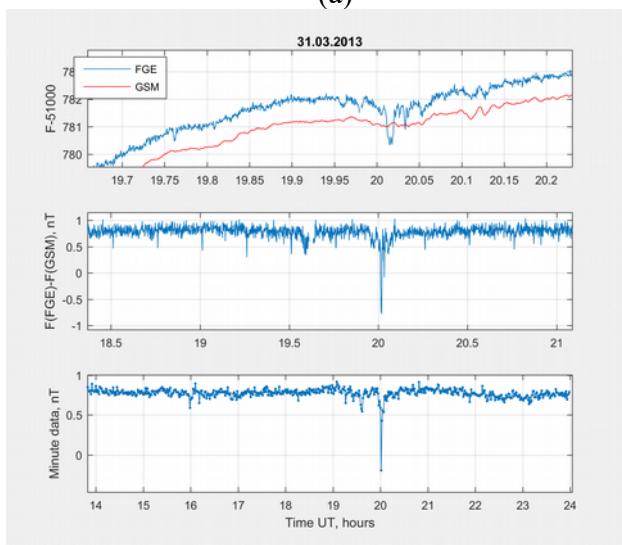
поле около 01:36UT была изолированная короткая вариация с заметной амплитудой (до 2 нТл в модуле F). При этом в разности секундных Fv и Fs аномалии не наблюдается, в то время как в разности минутных Fv и Fs она существует (рис. 46в) и совпадает с той, что отмечается с помощью Data Viewer. С достаточной уверенностью можно утверждать, что наблюдаемый эффект связан с различием в методике получения минутных значений по результатам измерений компонентным (средневзвешенное значение) и скалярным (мгновенное значение) магнитометрами. Соответственно, никакой дополнительной обработки не требуется. Противоположный пример показан на рис. 47 - при проверке с помощью Data Viewer 31.03.2013 г. около 20:00UT в deltaF был обнаружен выброс до -1 нТл.



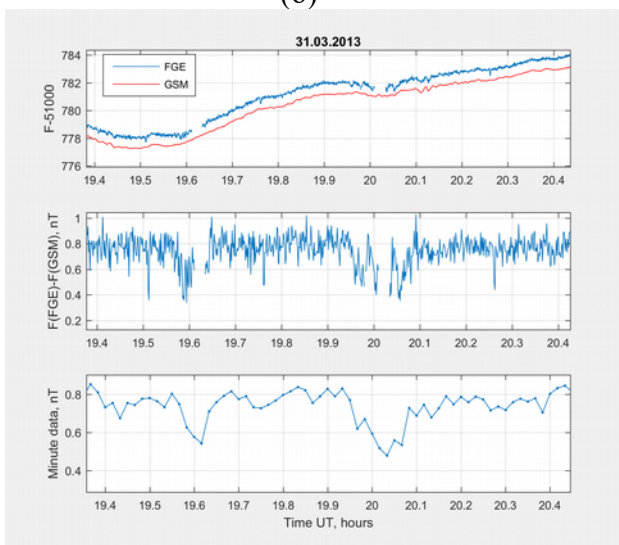
(а)



(б)



(в)



(г)

**Рис. 47.** Пример проверки данных Definitive за 31.03.2013 г. с помощью Data Viewer и последующего анализа выделенной аномалии. (а) — график Data Viewer, на котором около 20:00UT в deltaF виден выброс амплитудой до -1 нТл. (б) — вариации dZ (секундные данные). (в) и (г) — вариации секундных значений Fv и Fv и deltaF по секундным и минутным значениям Fv и Fs до и после удаления помехи.

При просмотре первичных данных выяснилось, что в результатах измерений вариометром FGE в это время наблюдается шум, сопровождающийся общим снижением уровня до 1.5 нТл (рис. 47б). В результатах измерений F скалярным магнитометром помеха не отмечается. Эта аномалия была идентифицирована как помеха (в том числе имеется запись в журнале

обработки) и её значительная часть была удалена из секундных данных. После этого в  $\Delta F$  по минутным значениям  $F_v$  и  $F_s$  аномалия стала не более 0.2 нТл (рис. 47в). Конечно, удаление сопровождалось значительными потерями в исходных данных, превышающим "правило 90%", однако нами это минутное значение было оставлено в итоговых данных;

- повторно вычислить минутные значения вариаций, используя скрипт `fge_cycle_min_var.m`, установив в нём требуемую начальную/конечную даты.

После завершения просмотра данных за год с помощью Data Viewer и пересчёта суточных файлов средних значений вариаций требуется вычислить полные значения составляющих и подготовить бинарные (IAF) месячные файлы, которые снова проверяются с помощью Data Viewer, прежде всего на тех сутках, где были обнаружены проблемы. Возможно, единственным решением окажется удаление недостоверных данных на этапе посуточной обработки скриптом `fge_cycle_min_var.m`.

#### **4.10. Отступление IX. Вычисление средних значений при пропусках в исходных данных ("правило 90%")**

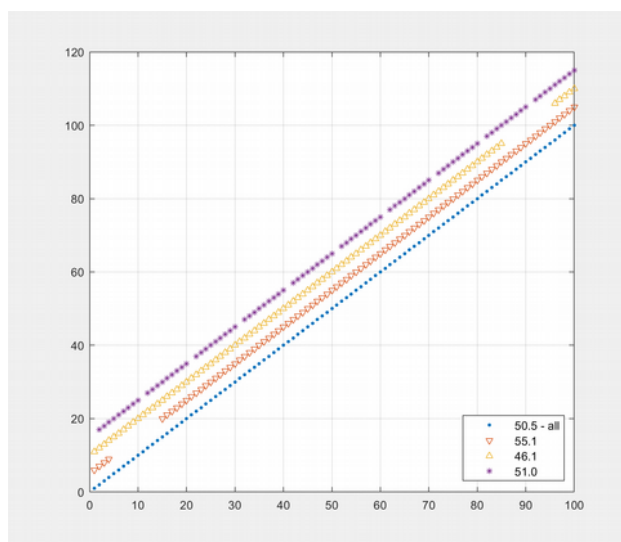
В соответствии с рекомендациями INTERMAGNET Technical Reference Manual (2012, раздел 2.2) при вычислениях средних значений любого временного масштаба предлагается следовать "правилу 90%", т. е. при наличии в массиве, используемого для вычисления среднего, более 10% пропусков, среднее значение кодируется как отсутствующее (девятки в файлах с форматами INTERMAGNET). Правило очень простое, однако не всегда учитывающее реальную ситуацию с данными.

На наш взгляд, основное противоречие, которое здесь возникает, но о котором обычно не говорится — это сопоставление рисков получить недостоверные результаты, с одной стороны, используя при исследованиях средние значения, вычисленные по неполному ряду первичных данных, а с другой — заполняя в используемом массиве средних значений пропуски, которые были принудительно созданы из-за неполноты первичных данных. Другими словами, обсерватория при наличии пропусков в первичных данных может воспользоваться правилом "90%" и подготовить ряд средних минутных (часовых, суточных) значений с пропусками. Как альтернативный вариант может быть подготовлен полный ряд средних значений, однако достоверность части элементов в этом ряду, вычисленных по неполным первичным данным, будет под вопросом. Исследователь-пользователь, получив неполный ряд средних значений, в большинстве случаев вынужден заполнять пропуски тем или иным методом, неизбежно внося ошибки и снижая достоверность результатов своего анализа. С другой стороны, используя полный ряд с неизвестным качеством некоторых его элементов, он также будет получать ошибки в своих результатах. Сопоставление этих ошибок, конечно, гипотетическое, является важным моментом в обсуждаемой проблеме.

Рассмотрим несколько идеализированных случаев, показывающих, что "правило 90%" может быть неэффективным. При этом надо понимать, что это всего лишь отдельные примеры из необъятного количества всевозможных вариантов, среди которых есть не менее показательные примеры эффективности "правила 90%".

Пусть измеряемая величина в процессе наблюдений не изменяется и остаётся равной, допустим, 10, т. е. имеем 60 минутных значений 10,10,10,...,10. Теперь представим, что половина данных отсутствует. "Правило 90%" требует, чтобы мы забраковали среднее значение 10, полученное из оставшихся тридцати "измерений". Но очевидно, что это среднее значение, полученное по неполному ряду, точно равно правильному значению. Даже если мы измерим всего одно значение в час и будем использовать его в качестве среднего, мы не получим ошибку. Альтернативный случай — когда мы имеем всего одно значение из этого ряда, но попадающее на некоторую аномалию. Полученное среднее значение никак не будет достаточно представительным для этой выборки, поскольку даст смещённую оценку среднего значения.

Ещё один пример. Пусть "измеренные" значения — линейно растут с 1 до 100. Рассмотрим пропуски десяти значений непрерывным фрагментом в начале ряда, в конце ряда и равномерно по ряду (нет каждого десятого значения). Графики этих "измерений" показаны на рис. 48. Там же приведены средние значения, вычисленные по этим искусственным рядам. Как видим, "правило 90%" может приемлемо работать в первых двух случаях (при пропусках непрерывным фрагментом в начале или в конце ряда) и некорректно для последнего случая, с равномерным распределением пропусков.



**Рис. 48.** Искусственный пример "измерений", линейно растущих от 1 до 100, в т.ч. полный ряд и с пропусками 10% данных в начале ряда, в конце и равномерно по времени. В легенде указаны средние значения для каждого ряда.

Ещё на одном примере покажем возникающие проблемы с заполнением пропусков в публикуемых данных. Допустим, мы имеем "результаты измерений" в виде минутных данных за 10 часов, т. е. ряд длительностью 600 мин. Последовательность из 600 чисел сгенерирована с помощью функции случайных чисел `randn()` из пакета MATLAB, а с помощью функции кумулятивной суммы `cumsum()` она трансформирована в ряд, имитирующий временное поведение некоторой величины. Затем, как и в примере выше, в часах с 04 по 09 в данные были введены пропуски: 10 минутных значений заполнены символами NaN в начале часа, 10 - в конце часа и 10 случайным образом распределены по часу. Все полученные кривые показаны на рис. 49.



Как и ожидается, среднечасовые значения по минутным данным с пропусками, распределённым по часу, более близки к действительным значениям, чем среднечасовые по данным с пропусками в виде непрерывных 10-минутных фрагментов. Однако, более интересная картина возникает, когда в соответствии с "правилом 90%" часовые средние для часов 04-09 будут удалены как недостоверные и в таком виде с ними будет иметь дело пользователь. Если у него в рамках своих исследовательских задач возникнет необходимость заполнить отсутствующие за 6 часов данные, например, линейной интерполяцией, то возникающие ошибки будут на порядок превышать те, которые дают часовые данные, вычисленные по неполным минутным рядам.

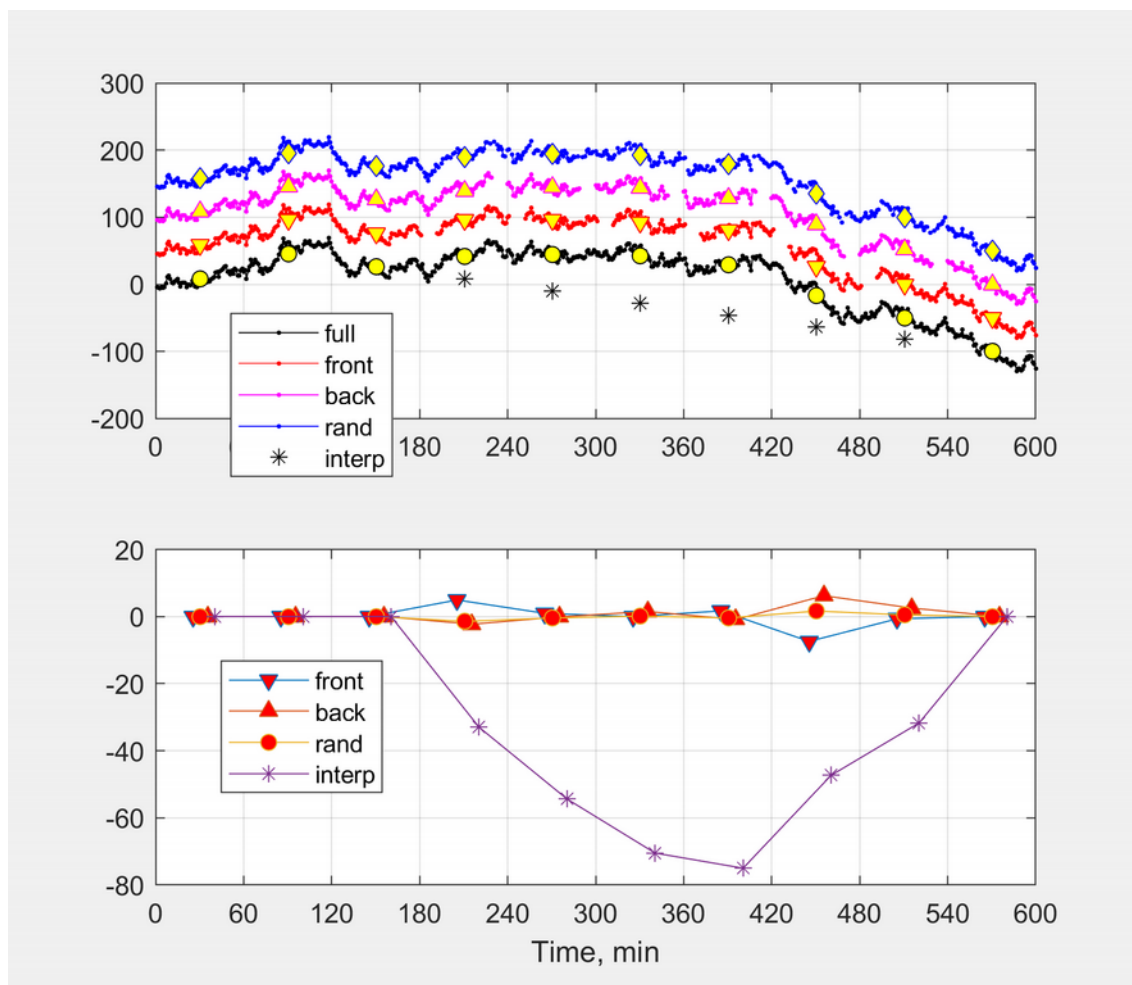


Рис. 49. Имитация измерений с пропусками в результатах. Верхняя панель: "full" – полный ряд из 600 минутных значений, "front" – пропуск 10-ти значений в начале каждого часа в интервале с 04 по 09 час, "back" – пропуск 10-ти значений в конце этих же часов, "rand" – 10 пропусков случайно распределены в пределах часа из этого интервала. Маркерами показаны средние часовые значения по этим рядам, символом "\*" представлены результаты линейной интерполяции для часов с пропусками. Нижняя панель: отклонения среднечасовых значений, вычисленных по данным с пропусками и и интерполяцией, от часовых значений по полному ряду.

Необходимо ещё раз подчеркнуть, что рассмотренные выше примеры являются имитационными, в значительной мере искусственными и вряд ли достаточно представительны. Тем не менее, они показывают, что вопрос с отбраковкой средних значений, полученных по неполному ряду первичных данных,



неоднозначен. Но можно сделать как минимум два вывода:

1) при принятии решения о применении "правила 90%" необходимо учитывать "интересы пользователя", который будет использовать средние значения в своих исследованиях и, в отличие от магнитолога, работающего с исходными результатами измерений, не имеет никакой другой информации, кроме опубликованной;

2) эффективность (и корректность) использования "правила 90%" в значительной степени зависит от поведения исходных данных. Ясно, что при их сильной изменчивости вероятность получить существенно недостоверный результат при неполной выборке возрастает.

Последнее обстоятельство используется в методике вычисления средних значений поля за час и за сутки. Известно, что стандартная ошибка среднего значения, полученная по выборке из  $n$  элементов, определяется как  $\sigma/\sqrt{n}$ , где  $\sigma$  - стандартное отклонение по выборке. Таким образом, зная  $\sigma$  и задавая требуемое стандартное отклонение для среднего значения  $\sigma(\text{cp})$ , можно оценить требуемый объём выборки, который обеспечит заданное  $\sigma(\text{cp})$ . Методика реализована в виде функции **mean\_with\_gaps()**. В качестве входных данных для функции используются часовой или суточный массив минутных значений  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . По элементам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  вычисляется модуль  $F$ , для которого находится стандартное отклонение  $\sigma$  (функция **std()** из пакета MATLAB). Затем определяется объём выборки  $N$ , который требуется, чтобы получить заданное значение  $\sigma(\text{cp})$ :

$$N = (\sigma / \sigma(\text{cp}))^2.$$

Если  $N$  превышает объём выборки (реально имеющихся элементов), то среднее значение не вычисляется (заполняется символом NaN). Кроме того, здесь же оценивается и соответствие "правилу 90%" - оно также используется, вместе с вышеописанным методом. Отметим следующее:

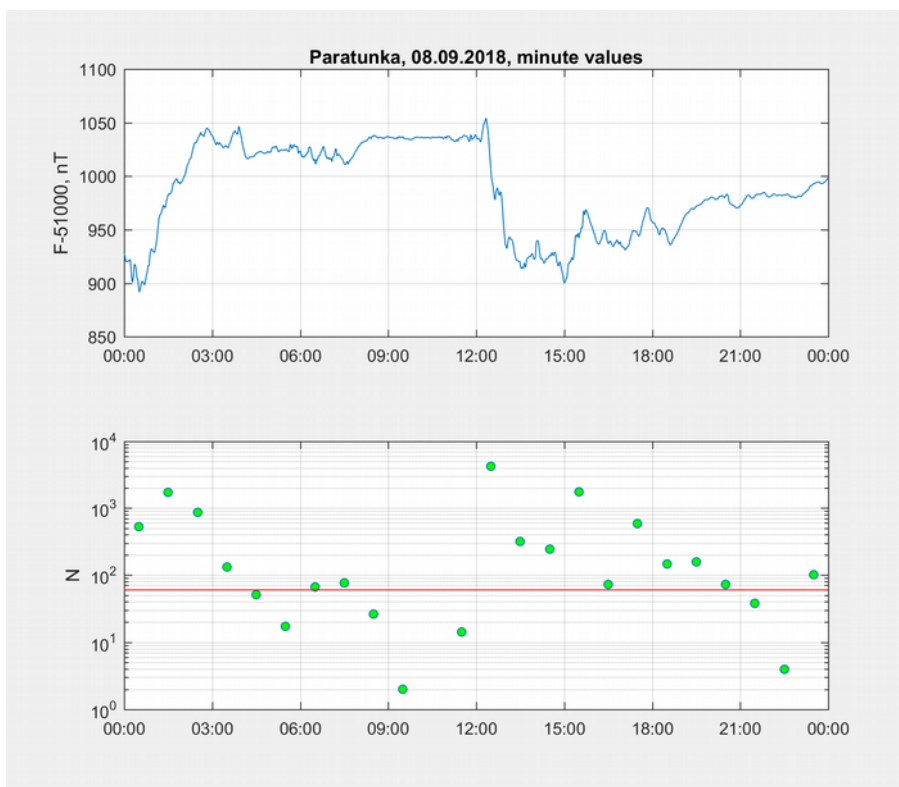
1) при вычислениях заданное значение  $\sigma(\text{cp})$  составляет 0.5 нТл. Необходимо понимать, что это именно стандартное отклонение, а реальные отклонения средних значений от действительных могут превышать и  $3\sigma(\text{cp})$ . Кроме того, здесь имеем дело со статистическим подходом "в среднем" — в каждой конкретной реальной ситуации картина может отличаться от "средней";

2) статистика корректно работает для случайно распределённых данных ("идеально" — для нормально распределённых). В реальности кроме "случайной" составляющей в выборке может присутствовать "систематическая" составляющая (на практике — почти всегда), например, сильный тренд. В этом случае значение стандартного отклонения  $\sigma$  будет завышенным и требуемый объём выборки также получится большим;

3) использование статистики для модуля  $F$ , а не для составляющих имеет исторические корни, когда в бинарных файлах записывалась величина  $F_s$ , а не  $\text{delt}dF = F_v - F_s$ , т. е. оценки  $\sigma$  делались как по результатам измерений векторным магнитометром, так и скалярным.

На рис. 50 показан пример оценки величины  $N$  по минутным данным  $F_v$ , полученных на обсерватории "Паратунка" во время магнитной бури 08.09.2017 г. Видно, что почти половина значений  $N$  превышает размер полной часовой выборки 60. Это значит, что пропуск даже одного минутного значения может привести к отличию вычисленного значения от ожидаемого со стандартным отклонением более 0.5 нТл.

Оценки требуемого объёма выборки при таком алгоритме могут оказаться более жёсткими, чем "правило 90%" - с этим мы сталкивались при проверке итоговых (Definitive) данных с помощью программы check1min.exe Яна Реды (Jan Reda), которая в некоторых случаях сообщала о несовпадении часовых и/или суточных значений в бинарных файлах (маркированных 999999) и вычисленных по минутным значениям. Ниже — пример из протокола проверки данных Definitive обсерватории "Хабаровск" КНВ за 2016 г.:



**Рис. 50.** Пример оценки требуемого объёма  $N$  выборки минутных значений для достижения стандартного отклонения  $\sigma(\text{cp})=0.5$  нТл. Верхняя панель: вариации модуля  $F_v$  (минутные значения) за 08.09.2017 г. (во время магнитной бури). Нижняя панель: оценки объёма выборки  $N$  при заданном  $\sigma(\text{cp})=0.5$  нТл и вычисленных для каждого часа стандартных отклонений. Красная горизонтальная линия на уровне 60 — объём без потерь данных.

===== Checking the calculation daily and hourly means =====

COMPARISON 2016 DAILY MEANS reported in khb16???.bin and calculated from 1 min data (displayed  $\geq 0.2\text{nT}$ )

|                       |                     |                    |   |
|-----------------------|---------------------|--------------------|---|
|                       | X                   | Y                  | Z |
| Days_when_differences | $\geq 0.2\text{nT}$ | or other problems: | 0 |

COMPARISON 2016 HOURLY MEANS reported in khb16???.bin and calculated from 1 min data (displayed  $\geq 0.2\text{nT}$ )

|                  |                      | X        | Y        | Z        |
|------------------|----------------------|----------|----------|----------|
| 19.03.2016 16-17 | Reported in IAF:     | 999999.0 | 999999.0 | 999999.0 |
|                  | Calculated from IAF: | 999999.0 | 999999.0 | 49224.7  |
|                  | Difference:          | 999999.0 | 999999.0 | 999999.0 |
| 19.03.2016 19-20 | Reported in IAF:     | 999999.0 | 999999.0 | 999999.0 |
|                  | Calculated from IAF: | 999999.0 | 999999.0 | 49218.5  |
|                  | Difference:          | 999999.0 | 999999.0 | 999999.0 |

Hours\_when\_differences>=0.2nT or other problems: 2

Здесь важно отметить, что, на наш взгляд, особые требования к часовым и суточным данным в бинарных (IAF) файлах вряд ли очень важны — они скорее носят ориентировочный характер, т.к. пользователь имеет возможность самостоятельно вычислить эти средние значения, используя тот или иной алгоритм. Кроме того, проблема возникает только при пропусках — однако, в основном качество данных Definitive обсерваторий высокое и пропусков минутных данных обычно очень мало.

#### 4.11. Заполнение пропусков в данных Definitive

Заполнение пропусков в данных основного магнитометра данными резервного в общем случае является не простой задачей. Существует несколько моментов, которые не имеют однозначных ответов:

- пропуски можно заполнять на уровне первичных (секундных) или на уровне итоговых (минутных) данных — что будет более оптимальным? В целом, предпочтительнее выглядит заполнение пропусков в первичных данных, т.к. после этого данные и основного, и резервного магнитометров образуют единый ряд, который проходит все процедуры обработки по единой методике. При этом также в значительной степени могут быть решены вопросы с "правилом 90%" для минутных данных. Но существуют и определённые проблемы: очень часто основной и резервный магнитометры имеют различную ориентацию (например, HDZ у FGE и FDI у dIdD), частота измерений может различаться, существуют специфические особенности приборов (например, зависимость между компонентами, температурные зависимости и т.п., по разному проявляющиеся на секундных и минутных данных и потому требующие решения до объединения двух рядов). При сопоставлении минутных данных речь идёт уже о статусе Definitive, то есть большинство из перечисленных выше проблем так или иначе уже решены, и мы имеем дело с полными составляющими, полученными по оптимальным базисным значениям;

- какого размера пропуски требуется заполнять? Вопрос не простой и вряд ли на него существует однозначный ответ. Например, единичный пропуск в минутных данных мы можем заполнить значением, полученным по измерениям резервным магнитометром, или пользователь данных заполнит этот пропуск интерполяцией. Возможность получить значимую погрешность существует в обоих вариантах. Аналогично, при длительном интервале с пропусками его заполнение данными резервного магнитометра более низкого качества, например, имеющим больший шум, может дать менее достоверные результаты, чем простейшие алгоритмы интерполяции;

- при заполнении пропусков на интервалах месяц или больше возникают вопросы с файлом базисных — нужно ли для этого периода показывать базисные значения резервного прибора, что будет сопровождаться скачками? В некоторых случаях возникают принципиальные проблемы, если системы ориентации основного и резервного магнитометров различаются,

например, HDZ и FDI, как была на обсерватории "Хабаровск" при переходе с ЦВМС "Кварц-6" на dIdD GSM-19FD. В этом случае базисные значения не сопоставимы и вряд ли возможно их разумным образом показать в одном файле.

Ясно также, что переход на более сложные технологии заполнения требует, в целом, более высокой квалификации магнитолога (не всегда) и приводит к более сложному программному обеспечению, что может сопровождаться неочевидными ошибками при вычислениях.

В описываемом здесь ПО выбран метод заполнения пропусков на уровне итоговых (Definitive) минутных значений. Он основан на достаточно очевидном положении. Технология магнитных наблюдений на обсерватории (непрерывные вариационные и дискретные абсолютные) различными магнитометрами, установленными в различных местах, по сути, "воспроизводит" измерения в единственной точке — на постаменте, на котором выполняются абсолютные наблюдения. Таким образом, неважно чем и неважно где мы измеряем — если измерения корректны и обработкой учитываются все сопутствующие редукции и преобразования, мы должны получить результат, совпадающий с реальным полем в этой выбранной точке.

На практике это выглядит тоже просто: мы выполняем полную обработку (за исключением вычисления среднегодовых значений и т. п.) для основного и резервного (или резервных) магнитометров и получаем два (или больше) рядов минутных Definitive-данных. Ожидается, что они будут совпадать. Это важный момент — иногда задают вопрос: "А почему они должны совпадать?" Ответ очевиден: "Потому, что мы получили данные, представляющие одно и то же реальное магнитное поле". Если же имеется несовпадение, то вопрос уже не о совпадении, а о том, насколько достоверно полученные результаты описывают поведение реального поля. Конечно, тут важна количественная мера несовпадения, поскольку наши измерения и вычисления отягощены случайными и систематическими ошибками и полного совпадения ожидать не следует — необходимо сопоставлять ряды и оценивать возникающие различия в каждом конкретном случае. Сейчас же будем исходить из того, что наша обработка и измерения правильны и полученные ряды совпадают (или близки, а различия лежат в допустимых пределах).

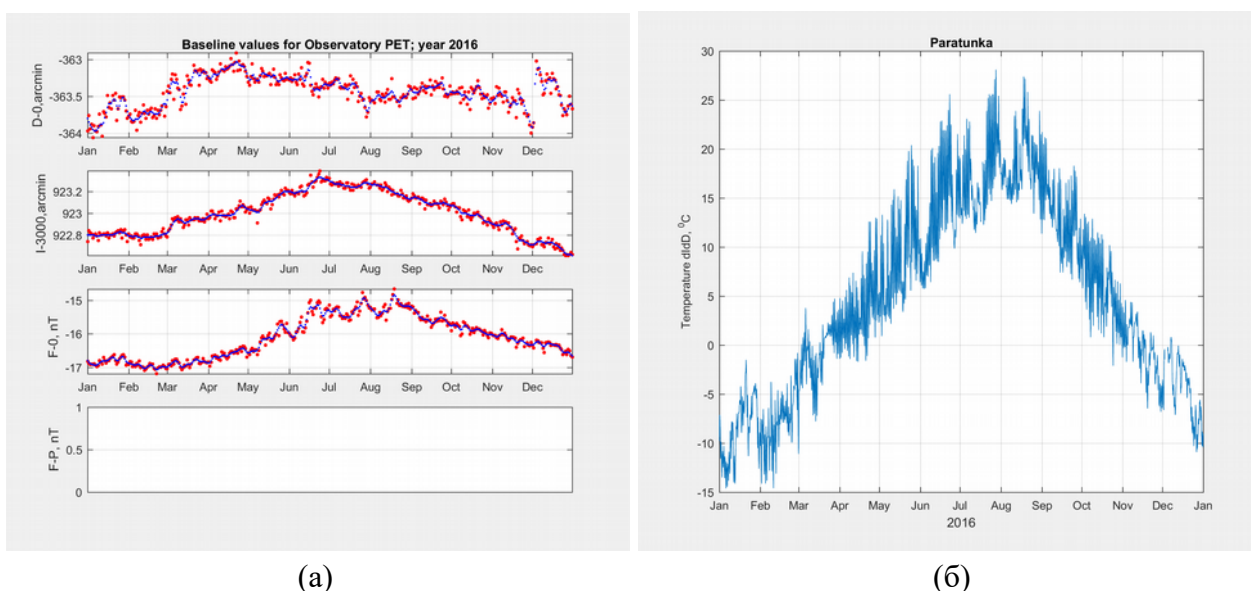
На обсерватории "Паратунка" в качестве основного компонентного магнитометра используется феррозондовый FGE-DTU, в качестве резервного — dIdD GSM-19FD. На обсерватории также имеется феррозондовый вариометр FRG-601 и векторный POS-4. Выбор dIdD обусловлен несколькими причинами: (1) в отличие от FRG-601 он установлен в отдельном павильоне на значительном расстоянии от основного FGE, поэтому помехи при технических работах в павильоне FGE в данных dIdD не возникают; (2) технология измерений dIdD основана на другом физическом принципе, поэтому часть помех, характерных для феррозондовых датчиков, в dIdD не проявляется; (3) магнитометры dIdD в целом имеют слабую зависимость от температуры - на обсерватории "Паратунка" это позволило использовать только систему пассивной стабилизации температурного режима его павильона (за счёт термоизоляции стен и крыши), хотя некоторые суточные вариации в D возникают, возможно, связанные с нагревом павильона Солнцем в летнее время (механизм эффекта не ясен). Общим для FGE и dIdD является использование карданного подвеса для уменьшения эффектов наклона основания — однако при землетрясениях фиктивные магнитные вариации возникают в результатах измерений обоими магнитометрами. FRG-601 даёт прекрасные результаты по вариациям, однако расположен в том же павильоне, что и FGE, и имеет повышенную и плохо моделируемую температурную зависимость. POS-4 является новой разработкой и пока работает в тестовом режиме, хотя его результаты в целом

сравнимы с результатами dIdD. На рис. 51 показаны павильон dIdD и его датчик на обсерватории "Паратунка".



Рис. 51. Магнитометр dIdD GSM-19FD на обсерватории "Паратунка". Левая панель — павильон dIdD (зима), высота стен 1.5 м, вход в павильон - через чердачный лаз. Правая панель - датчик dIdD на постаменте из стеклоблоков, стены и крыша изнутри обклеены пенополистиролом толщиной 10 см. В дальнем правом углу цифровой термодатчик DS18B20.

Процедура подготовки данных dIdD в статусе Definitive практически совпадает с той, что используется для FGE. В качестве независимого непрерывно измеряющего скалярного магнитометра выбран Оверхаузеровский магнитометр POS-1, который используется и для абсолютных наблюдений. На рис. 52 показаны итоговые базисные значения D0,I0,F0 магнитометра dIdD за 2016 г., вычисленные с помощью скрипта `base_didd_to_blfv200.m` (левая панель; разности F(dIdD)-F(POS) в файл базисных не занесены). Для сопоставления на правой панели представлены вариации температуры в павильоне dIdD (минутные значения) — видно, что сезонные изменения составляют около 40°C, а суточные вариации (локальный размах кривой) летом достигают 15°C (зимой они существенно сглаживаются глубоким снегом, создающим вокруг павильона и на крыше дополнительную термоизоляцию). Скачок D0 2 декабря 2016 г. на 0.4' учтён при вычислении базисных Adopted (файл `base_jumps_dIdD.dat`), причина скачка не установлена.



(а)

(б)

Рис. 52. Базисные значения (Definitive) магнитометра dIdD (Паратунка) за 2016 г. (левая панель) и температура в павильоне dIdD (правая панель).

Аналогично как при обработке данных FGE, для dIdD вычисляются средние минутные

значения вариаций  $dD$ ,  $dI$  и  $F$  (скрипты **didd\_cycle\_min\_var.m** и **didd\_process\_min\_var\_cycle.m**) с учётом результатов оперативной ежедневной обработки и внесения в файл **Remove\_dIdD.dat** информации о некачественных данных, требующих удаления. Затем используя суточные принятые (Adopted) базисные собирается годовой массив минутных значений составляющих  $D$ ,  $I$ ,  $F$  полного вектора поля, которые сохраняются в файл **one\_min\_2016\_01\_12\_didd.mat**. Результаты показаны на рис. 53.

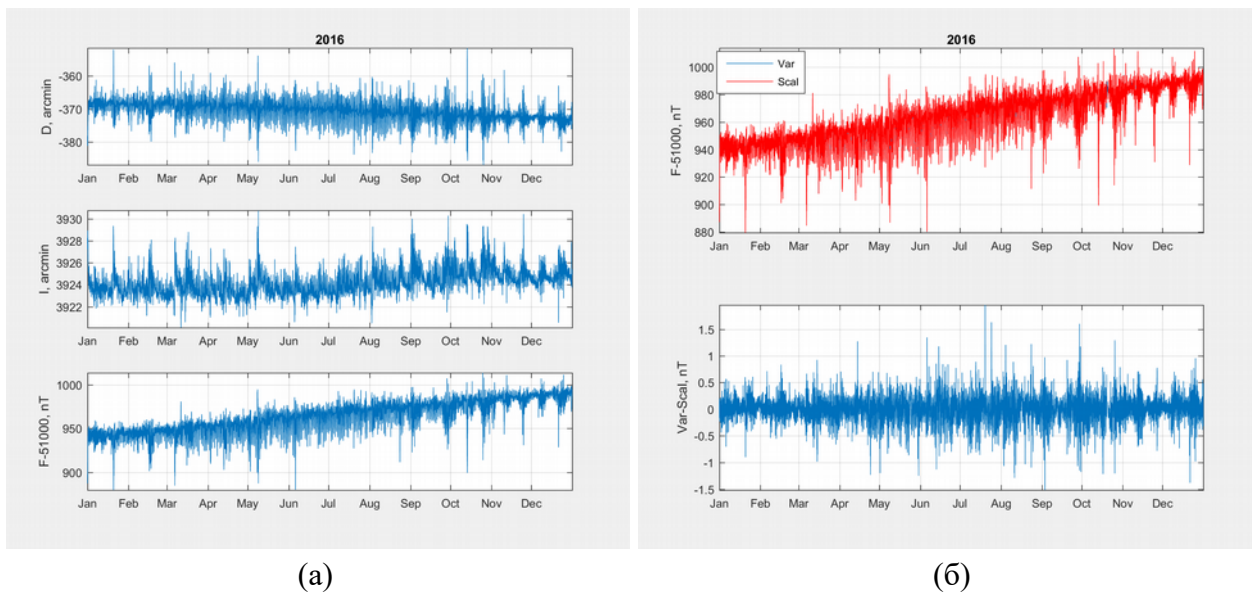


Рис. 53. Итоговые (Definitive) минутные данные за 2016 г., полученные по измерениям с помощью вариационного dIdD GSM-19FD и скалярного POS-1 магнитометров.

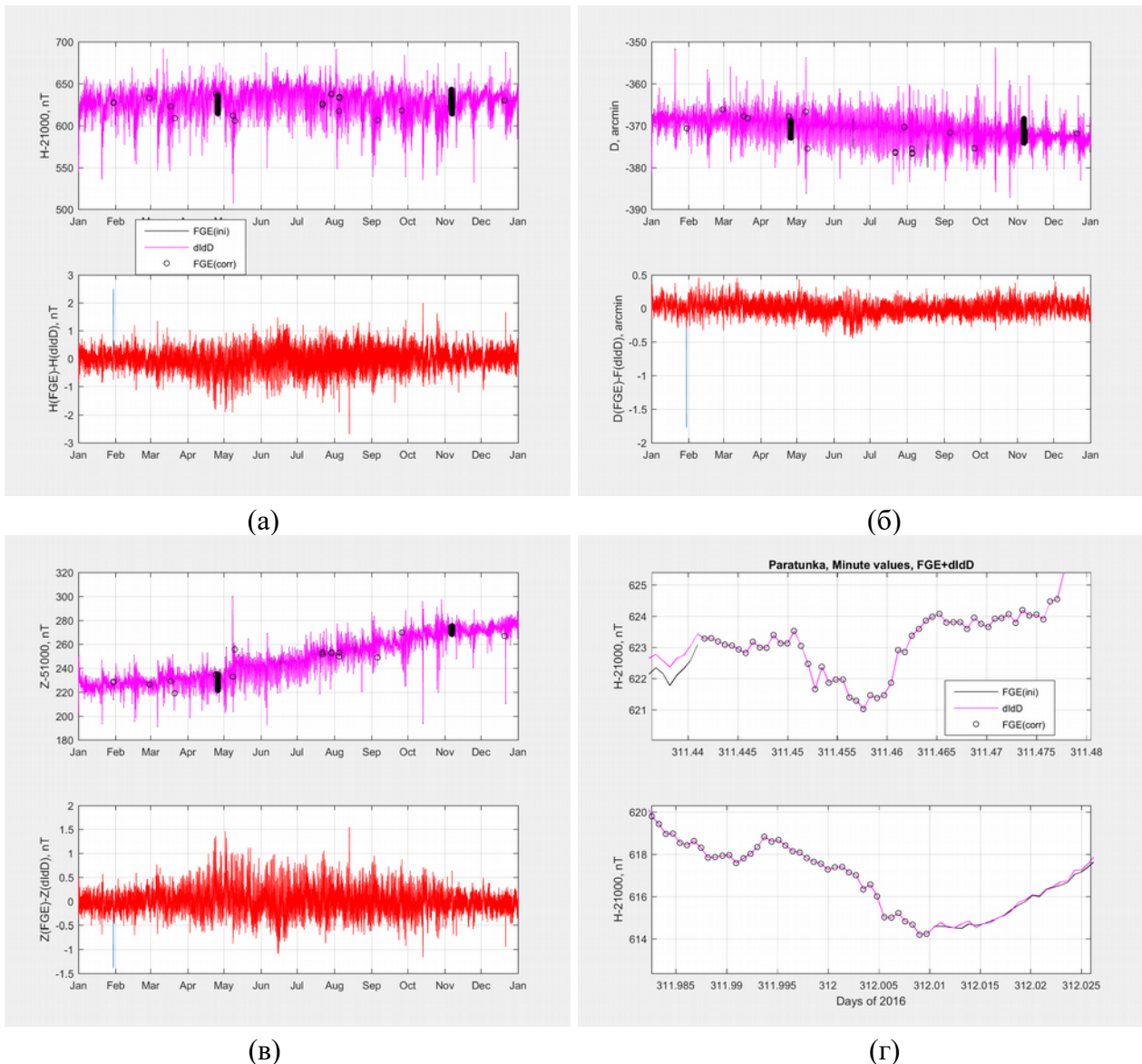
Необходимо отметить, что величина  $\Delta F = F_v - F_s$ , которая является достаточно важной для контроля достоверности результатов измерений компонентным вариометром, поскольку вычисляется по  $(H, Z)$  или  $(X, Y, Z)$  элементам, в случае с dIdD менее информативна, т. к. получена прямым измерением  $F_v$  и базисным значением  $F_0$ . Таким образом, здесь сравниваются два скалярных магнитометра, которые дают заведомо более стабильные результаты, как на коротких, так и на больших характерных временах. Два элемента, измеряемые с помощью dIdD — склонение и наклонение, остаются без внешнего контроля.

Далее начинается собственно процедура заполнения пропусков в данных FGE. Мы имеем два массива данных Definitive: для FGE –  $T, H, D, Z, F_s$  и для dIdD –  $T, D, I, F_v$ , имеющих одинаковую длину каждого вектора — 527040, пропуски заполнены символами NaN. По  $I$ - и  $F_v$ -данным dIdD можно вычислить  $H$ -,  $Z$ -элементы и получить полностью сопоставимые между собой ряды. Методически замена является совершенно простой процедурой — все значения FGE с NaN заменяются соответствующими данными dIdD. Если используемые при такой замене элементы dIdD также равны NaN, то фактически они ничего не изменяют: NaNs заполняются NaNs. Матричная математика MATLAB позволяет решить эту операцию практически один-в-один как она изложена методически, для примера для  $H$ -составляющей:

$k = \text{isnan}(Hfge); Hfge(k) = Hdidd(k);$  или одной командой  $Hfge(\text{isnan}(Hfge)) = Hdidd(\text{isnan}(Hfge));$

Программно описанное выше реализовано в скрипте **fge\_didd\_joint\_2016.m**. Результат его работы визуализируется на графиках (см. рис. 54). Здесь на верхних графиках показаны минутные данные FGE и dIdD, маркером "o" отмечены данные dIdD, которые использовались для заполнения пропусков, на нижних кривых — разности FGE-dIdD.





**Рис. 54.** Заполнение пропусков данных основного магнитометра FGE данными резервного прибора dIdD. (а), (б), (в) - на верхней панели минутные значения по FGE и dIdD (сплошные линии), символом "o" отмечены данные dIdD, которые были вставлены в интервалы с пропусками FGE, на нижней панели — разности FGE-dIdD. (г) — выделенные фрагменты для H-составляющей на границах заполняемого пропуска в ноябре 2016 г.

Как видно по разностям, имеются суточные колебания во всех составляющих, предположительно из-за короткопериодных температурных эффектов в измерениях dIdD. Это приводит к тому, что при нулевом среднем уровне FGE-dIdD, на отдельных участках суточных интервалов эти разности могут расходиться и прямая подстановка данных dIdD будет приводить к скачкам уровня, пусть и небольшим. Поэтому в скрипте предусмотрена корректировка отдельных фрагментов (постоянное смещение по ординате), величину смещения магнитолог подбирает визуально, по взаимному положению кривых на границах интервала с пропусками. Пример для H-составляющей показан на рис. 54г, где верхняя панель детализирует левую границу интервала, а нижняя — правую. Сама потеря данных 6 ноября почти за 12 часов произошла из-за сбоя в системе питания, что привело к повреждению программы, прошитой в ППЗУ регистратора Magdalog. Как видно, на левой границе интервала имеется небольшое смещение около 0.3 нТл, на правой границе кривые FGE и dIdD совпадают. Эти отклонения были приняты как приемлемые и коррекция не



выполнялась.

После проверки и корректировки всех заполняемых пропусков минутные данные сохраняются в годовой mat-файл. Затем собираются месячные бинарные IAF-файлы и выполняется тщательная посуточная проверка с помощью INTERMAGNET Data Viewer. При необходимости в скрипт **fge\_didd\_joint\_2016.m** вносятся изменения и дополнения, корректирующие проблемные данные и цикл обработки повторяется. После того, как результаты проверки покажут, что данные приемлемые, выполняются остальные этапы подготовки Definitive-данных (вычисление K-индексов, среднегодовых значений и т. п.). После этого файлы загружаются на "1st step" FTP-сервер и информируется их проверяющий от INTERMAGNET.