

УДК 004.045; 004.428; 004.942

СРЕДСТВА ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А. Ю. Гришенцев¹, А. Г. Коробейников²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

² Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук

Статья получена 10 февраля 2015 г., после доработки – 10 марта 2015 г.

Аннотация. Предложены средства централизованного обеспечения технической интероперабельности в распределённых геоинформационных системах (ГИС). Рассмотрено несколько вариантов возможных решений данной проблемы, выбрано решение, называемое в рамках работы «модуль набора преобразований», наиболее оптимальное с точки зрения обеспечения безопасности и масштабируемости ГИС при минимальных затратах на модернизацию программного обеспечения. Проектное решение основано на встраиваемом в файловый сервер программном обеспечении, осуществляющем скрытое от пользователей преобразование форматов. Авторами статьи разработаны и внедрены программно-алгоритмические средства преобразования форматов данных. В ходе модернизации отечественных станций вертикального зондирования ионосферы выполнен анализ и восстановления описание формата *.ion, необходимое в связи с частичной утратой документации. Рассмотрены проблемы внедрения модуля наборов преобразований в структуру геоинформационной системы, технические проблемы интеграции отечественных ГИС в структуру мировых центров данных (МЦД). Предложена модель построения единого информационного пространства ГИС.

Ключевые слова: САПР, геоинформационные системы, проектирование, интероперабельность.

Abstract. Centralized provision of technical interoperability in distributed geophysics information systems (GIS) is proposed. Several options for possible

solutions to this problem are considered, the solution is chosen, called in the framework of the module “set of transformations”, the most optimal from the point of view of security and scalability of GIS with minimal software upgrade. Design solution is based on the software which realizes format conversion hidden from users. The authors developed and implemented software and algorithmic means for converting data formats. In the course of modernization of domestic stations of vertical ionospheric sounding the analysis and recovery of format description * .ion, required in connection with the partial loss of documentation, are fulfilled. The problems of implementation of the module of transformation sets in the structure of geographic information systems, technical problems in the integration of domestic GIS structure of world data center (WDC) are considered. The model of building of unified information space of GIS is proposed.

Keywords: CAD, GIS, engineering, interoperability

Введение

Развитие информационных технологий не обходит стороной ГИС, а зачастую даже порождено потребностями ГИС. Так, например, множество оборудования было разработано специально для спутников, осуществляющих дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) [1]. В связи с некоторым временным «провалом» (в 90-е – 00-е гг.) в сфере обновления технического арсенала отечественных ГИС, и уровнем современного развития информационных технологий, актуальной является проблема интероперабельности и отсутствие концептуального единства в пространстве доступа и обработки данных. В большинстве случаев обновление оборудования для каждого элемента ГИС производится комплексно и проблем технической интероперабельности на аппаратном уровне в масштабах ГИС обычно не наблюдается, при этом вопросы интероперабельности переходят в область разработки программного обеспечения, использования специализированных протоколов передачи, форматов хранения и методов обработки данных [2,3,4]. Поэтому далее в статье, говоря о технической интероперабельности в ГИС, мы будем иметь

виду интероперабельность на уровне протоколов и форматов данных [5,6]. Совместимость на уровне протоколов передачи данных также называется «Coexistent».

Следует отметить, что под данными понимаются не только данные, полученные в результате научных наблюдений, но, например, управляющие команды, сообщения о состоянии систем и пр. В большинстве случаев каждый элемент ГИС (спутник, аппарат авиамониторинга, наземная станция наблюдения) получает и отдаёт комплекс данных. Например, спутники ДЗЗ оснащены мультиспектральными приёмниками и регистрируют геоизображения в различных диапазонах частот. Так например, система ДЗЗ EOS MODIS [1] использует 36 спектральных каналов для получения изображений поверхности Земли и околоземного пространства в различных спектральных диапазонах. Дополнительно каждый спутник требует обмена телеметрическими данными, связанными с мониторингом за состоянием и управлением оборудованием спутника. Другой пример: станции вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) [7,8,9] обычно регистрируют не только ионограммы, но и напряжённость магнитного поля в месте расположения станции ВЗИ, возможно, метеоданные.

Высокая надёжность оборудования ГИС обычно позволяет производить его длительную эксплуатацию, при параллельном вводе в эксплуатацию нового оборудования и/или частичном обновлении, при сохранении актуальности архивных данных возможно возникновение проблем технической интероперабельности.

Нельзя обойти стороной и вопросы международного сотрудничества в формате взаимодействия с МЦД. Для эффективного международного обмена данными требуется оперативное предоставление результатов наблюдений и предварительного анализа в определённых, хорошо документированных форматах, для формирования единого концептуально целостного прогноза необходимо использование общих принципов обработки и анализа данных [8,9,10]. Безусловно, имеется необходимость разграничения доступа к

информации, продиктованная геополитическими интересами, охраной авторского права, корпоративными интересами, как на уровне международного сотрудничества, так и в рамках внутри организации, обеспечивающей функционирование ГИС.

В соответствии с определением, *интероперабельность* (Interoperability) – это способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена [5]. При развитии средств интероперабельности в распределённых ГИС, в соответствии с эталонной моделью интероперабельности [6], присутствуют не только техническая (физическая, синтаксическая, семантическая) интероперабельность, но и организационная (консолидационная и координационная). Развитие технического уровня интероперабельности позволяет создавать единое информационное пространство [7] в масштабах конкретной ГИС, и, что более значимо, осуществлять интеграцию в структуру МЦД [8,9,10], что в свою очередь неизбежно приводит к консолидационной и координационной интероперабельности [6] в масштабах международного научного сотрудничества [10].

Анализ работы отечественных станций ВЗИ позволил выявить существенные проблемы уже на уровне средств технической интероперабельности. Например, достаточно распространённым способом представления ионограмм является графический формат *.png, данный формат удобен для визуального восприятия, но при этом малоприспособлен для машинной обработки в связи с утратой части данных. Множество эксплуатируемых ионозондов имеют специфические, в большинстве случаев несовместимые между собой форматы [9,11,12]. В последние годы широкое распространение получили ионозонды CADI [9] канадского производства, предоставляющие ионограммы в форматах: *.md1, *.md2, *.md3, *.md4. Указанные форматы позволяют сохранять всю необходимую информацию данных вертикального зондирования, при этом имеют значительное распространение по всему миру. Существенным плюсом форматов является компактная форма хранения

информации, способствующая разгрузке ресурсов памяти и каналов передачи данных.

Результаты данной работы востребованы в отечественных системах ВЗИ и внедрены [7,12,14] в практику организации ГИС на базе Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) и частично в практику Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Таким образом, данная работа развивает научно-исследовательскую систему отечественных распределённых станций ВЗИ, способствуя повышению её эффективности, тем самым обеспечивается актуальность работы.

Целью работы является развитие и внедрение в практику эксплуатации станций вертикального зондирования ионосферы средств технической интероперабельности, удовлетворяющих требованиям скрытого (от пользователя или программы) и безопасного преобразования форматов данных ионограмм, общее повышение эффективности ГИС за счёт внедрения принципов и роста уровня интероперабельности.

Централизованная структура обеспечения интероперабельности

Оборудование, являющееся составной частью распределённых ГИС [7,9,13] и расположенное в структуре отдельных элементов ГИС (рис. 1), зачастую имеет глубокую интеграцию с форматами данных. Например, формирование данных может быть реализовано на аппаратном уровне, поэтому практическое обновление форматов в отдельных элементах ГИС может обернуться потребностью существенной доработки аппаратной части, что не всегда возможно и целесообразно. В рамках рассматриваемого подхода предлагается вести обмен данными между объектом координации и управления (ОКУ) и элементами ГИС на базе форматов и протоколов, наиболее подходящих из доступных на текущий момент.



Рис. 1. Блок-схема структуры ГИС оснащенная МНП

Для внедрения средств технической интероперабельности в концепцию рассматриваемой архитектуры ГИС предлагается выделение специального ресурса (рис. 1), называемого модуль наборов преобразований (МНП). Физическое воплощение МНП может быть выполнено в виде выделенного сервера, виртуальной машины или базы данных со специальным программным обеспечением.

Фактически МНП является разновидностью систем контроля версий. Основными задачами МНП является:

- предоставление исполняемого кода преобразования форматов и протоколов в ответ на запросы ОКУ;
- предоставление исполняемого кода обработки данных в заданном формате в ответ на запросы ОКУ;
- поддержка единообразия и использования наиболее новых, назначенных администратором или выбранных автоматически, версий программ для преобразования и обработки данных;
- по возможности скрытия от пользователя процедур преобразований;
- не противоречить принципам безопасности, т.е. сокрытие факта преобразования форматов от пользователей, управление правами доступа к данным и программами в соответствии с требованиями администратора.

При значительном многообразии аппаратных средств и операционных систем (в структуре ГИС) для уменьшения числа требующихся исполняемых кодов, целью которых является преобразование протоколов и форматов,

возможно возложить все преобразования на МНП. В этом случае может существенно возрасти нагрузка на канал связи между ОКУ и МНП [15,16], поэтому целесообразным является интеграция ОКУ и МНП в систему, связанную высокоскоростным каналом обмена данными.

Методы построения и интеграции модуля наборов преобразований

В большинстве случаев появление новых форматов обусловлено:

- ненужностью хранить некоторые данные (в основном служебную информацию), использовавшиеся в прежнем формате, например, неактуальные пути к файлам, файловые сигнатуры и др.;
- невозможностью сохранить в прежнем формате некоторую новую информацию, обусловленную, например, появлением новых методов аппаратной и/или программной предобработки данных;
- модернизацией внутренней структуры файлов (например, применения нового метода сжатия);
- внедрением оборудования сторонних производителей.

При преобразовании «совместимых» форматов обычно есть возможность сохранить основную информацию, при этом в большинстве случаев происходит потеря некоторой части служебной информации. Такая потеря допустима, если служебная информация не является необходимой пользователю, и её утрата, при преобразовании форматов, не влияет на качество обработки и анализа данных. Для данных, полученных в результате научных исследований, служебная информация зачастую является востребованной, поэтому необходимо сохранение данных в исходных форматах (архивирование) для возможности восстановления такой информации. Преобразование форматов с последующим сохранением данных в нескольких форматах (кеширование) может приводить к значительному увеличению требуемого объёма дискового пространства. С другой стороны, если данные в преобразованном формате не сохранять, то при каждом обращении необходимо производить преобразование формата, что приведёт к росту потребления машинного времени. Оптимальное решение данного вопроса зависит от доступных

вычислительных ресурсов: дискового пространства, мощности процессоров, характеристик каналов передачи данных. Таким образом, принятие решения о возможности и необходимости кэширования является задачей оптимизации использования вычислительных ресурсов ГИС [15].

Возможным решением скрытого от пользователя преобразования формата является применение прокси-программ. Пусть некоторая программа M способна принимать на вход данные $F1$, генерируя при этом результат R , так что $R=M(F1)$. Пусть формат $F1$ совместим (взаимно преобразуем с сохранением данных, достаточных для правильной интерпретации программой M) с форматом $F2$, причём преобразование осуществляет программа $T: F2 \rightarrow F1$. Тогда для получения результата R из данных в исходном формате $F2$ необходимо выполнить следующие преобразования: $R=M(T(F2))$. Процедуру преобразования $T(F2)$ желательно скрыть от процесса M , а следовательно, и от пользователя (или программы), инициировавшего исполнение. Скрытое прокси-преобразование $T(F2)$ для пользователя должно выглядеть как непосредственная обработка программой M данных в формате $F2$.

Рассмотрим несколько возможных решений, не противоречащих политике безопасности в рамках той или иной операционной системы (ОС).

1. Осуществляется вызов программы M из программы T . После вызова $T(F2)$ формируется временный файл формата $F1$, затем вызывается программа $M(F1)$. Такой подход хорош для приложений, в которые имя файла передаётся в качестве параметра команды на выполнение, и не будет работать, когда необходимо прочитать $F2$ непосредственно из программы M .

2. «Незаметное» преобразование из формата $F2$ в $F1$ осуществляется встроенными процедурами в файловый сервер, работающий по протоколу FTP (SFTP) [16], при этом программа M (клиент) и данные $F2$ (сервер) расположены на различных логических сетевых узлах (возможно на одной физической вычислительной машине). На стороне клиента форматы $F2$ отображаются как $F1$, т.е. все преобразования скрыты от клиента. Такой подход (рис.2) хорошо масштабируется, обеспечивает условия безопасности, не вызывает увеличения

числа копий файлов данных. Значительным преимуществом такого подхода является независимость от установленной на стороне клиента ОС и ПО, простая организация удалённого доступа, а соответственно и облачных вычислений.

3. Непосредственный перехват обращений программы M к файлам $F2$, с последующей подменой $F2$ на $F1 = T(F2)$. Например, в ОС Windows может быть осуществлён с помощью перехвата системных вызовов, что является небезопасным.

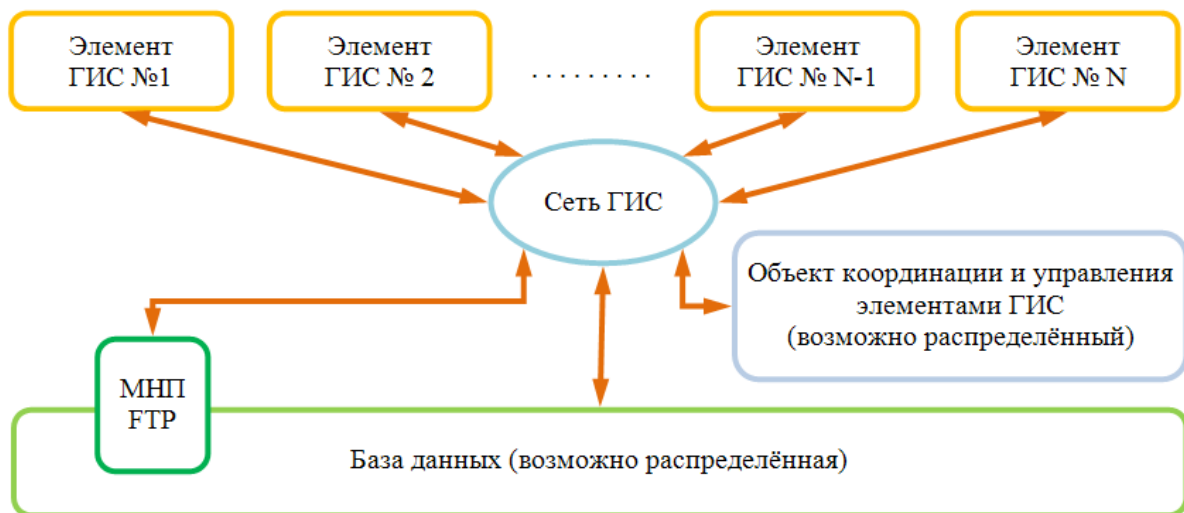


Рис. 2. Блок-схема структуры ГИС, оснащенная МНП выполненного в виде FTP сервера

На взгляд авторов, для практической реализации наиболее подходит решение 2 (рис. 2), позволяющее:

- выполнять условия безопасности;
- масштабировать систему, не производя модернизации ПО;
- осуществлять удалённый доступ и реализовывать методы облачных вычислений;
- не перегружать базу данных копиями файлов в различных форматах.

Полезным свойством выбранного решения является централизация средств обеспечения технической интероперабельности.

Предложенное решение позволяет реализовать методы технической интероперабельности как в локальном масштабе распределённой ГИС, так и в глобальном масштабе международного сотрудничества в рамках МЦД [8,10,17].

Практическая реализация средств технической интероперабельности при модернизации систем ВЗИ

Практическая реализация предложенного метода осуществлена в рамках модернизации системы ВЗИ ИЗМИРАН, для систем ВЗИ ААНИИ реализованы программные библиотеки чтения файлов в формате *.md1, *.md2, *.md3, *.md4.

Дополнительно в ходе модернизации станций ВЗИ ИЗМИРАН решалась задача восстановления формата *.ion, потребовавшаяся в связи с утратой части документации [7, 13].

Авторами статьи были разработаны библиотеки (C++) взаимного преобразования файлов в форматах *.ion, *.csv, *.md1, *.md2, *.md3, *.md4 и одностороннего преобразования в форматы: *.png, *.bmp. Библиотеки легко интегрируются с сокетами ОС Windows [18] или ОС семейства *nix (Linux, UNIX) [19], позволяя создать собственный FTP (SFTP) сервер, содержащий процедуры скрытого преобразования форматов. Сформирован пакет документации описания специфических форматов *.ion, *.md1, *.md2, *.md3, *.md4 и разработанного ПО. Произведено тестирование, отладка и внедрение разработанных программных средств: Акт о внедрении программы автоматизированной обработки данных АИС-М в систему ВЗИ ИЗМИРАН, от 03/07/2012.

Формирование единого информационного пространства распределённой ГИС

Проектирование распределённых ГИС является непрерывным динамическим процессом [20, 21]. Современные распределённые ГИС с набором высокотехнологичных методов и средств получения и обработки данных являются реализацией некоторых моделей (математических, технологических, инженерных) созданных коллективами разработчиков:

учёными, инженерами. Процесс производства данных распределёнными ГИС возможно разделить на:

- рутинные процессы получения данных (аппаратно-программные средства получения данных);
- процессы первичной обработки данных (в том числе, размещение в БД, систематизация, документация);
- процессы обработки и анализа (моделирование, исследование, прогнозирование, документирование).

Процессы первичной, последующей обработки и анализа в большинстве случаев имеют более высокую частоту обновления, по сравнению с рутинными процессами получения данных. В свою очередь, процессы обработки и анализа развиваются быстрее процессов первичной обработки данных. Прослеживается тенденция более высокой скорости обновления программных средств по сравнению с аппаратной и более высокой скоростью развития средств, находящихся на периферии распределённой ГИС, т.е. средств, являющихся интерфейсами распределённой ГИС.

В качестве примера возможно рассмотреть методы ВЗИ. Так, ионозонды АИС, работающие в составе станций ВЗИ с конца 50-х начала 60-х годов, за время своего существования претерпели одну аппаратную модернизацию (в начале 2000-х годов) и две-три концептуальных программных модернизации в сегменте обработки и анализа данных (и это при том, что вычислительные средства стали получать повсеместное распространение с конца 80-х гг. XX века, а для ионозондов АИС понадобились только после модернизации в 00-х гг.) [13]. Обновление программных средств имеет ряд специфических особенностей, которые стимулируют, по сравнению с аппаратными средствами, более высокую скорость их развития:

- внедрение модернизаций (в большинстве случаев новые программные средства ГИС являются модернизацией уже имеющихся), заключается в добавлении некоторых новых методов, являющихся программной реализацией математических моделей;

– возможность возврата к прежним версиям, в случае необходимости достаточно легко вернуться к прежним стабильным версиям программного обеспечения;

– техническая интероперабельность, при помощи программных средств легче реализовать множество доступных форматов и протоколов данных, чем при помощи аппаратных;

– внедрение новых программных средств дополнительно стимулируется общим трендом развития информационных технологий, в современном мире именно программные средства обеспечивают интерфейс распределённой ГИС.

Организация любой ГИС имеет в своей концептуальной основе и практической реализации некоторое многообразие математических моделей, основанных на представлениях об изучаемых физических явлениях и методах их изучения.

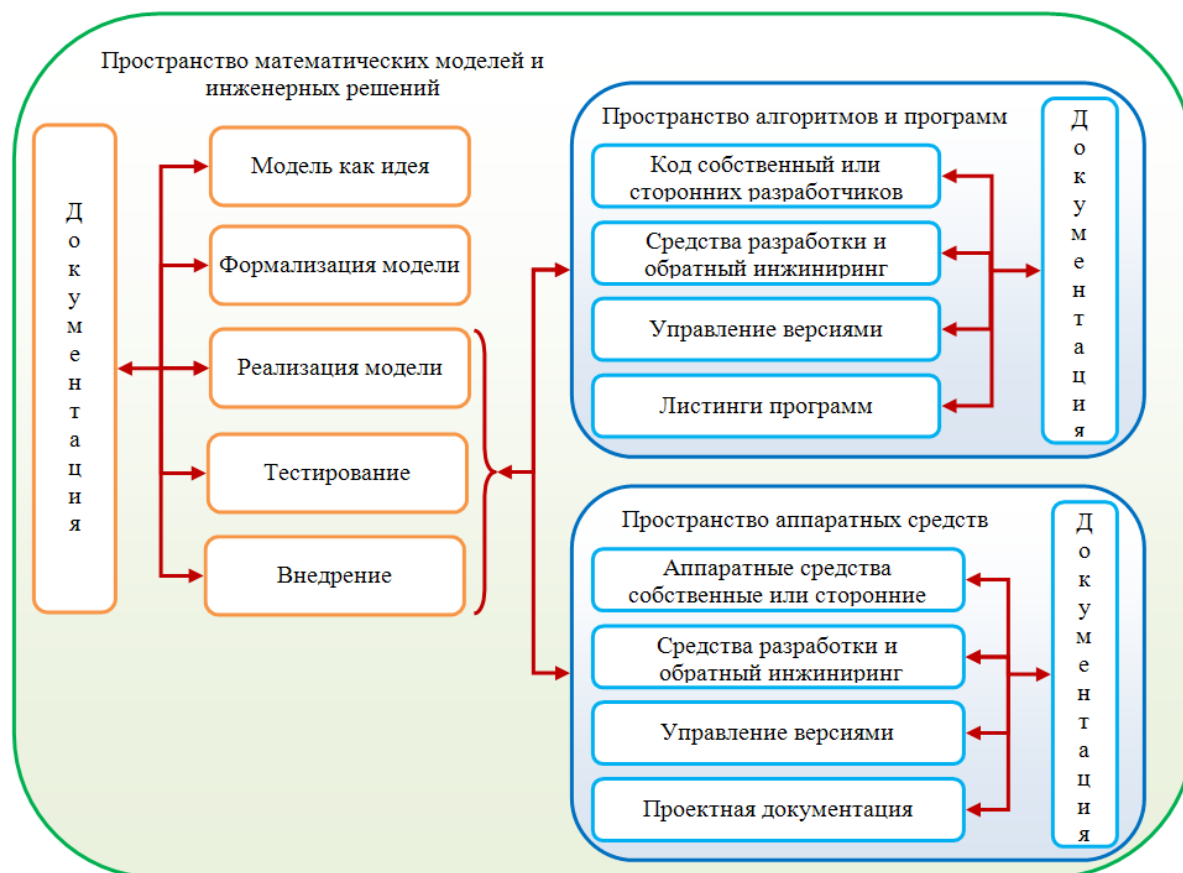


Рис. 3. Пространство математических моделей, совмещённое с пространствами аппаратных и программных средств

Таким образом, непрерывное развитие ГИС на основе развития научных знаний и доступных технологий позволяет рассматривать ГИС как реализацию математических моделей во всём многообразии проявлений: от аппаратных (физических) до программных (виртуальных) реализаций (рис. 3). Совокупность реализаций таких моделей воплощает ГИС и служит достижению целей поставленных перед ГИС. Для обеспечения работы ГИС необходимо «научить» модели (математические и физические реализации) образующие ГИС взаимодействию. Основой взаимодействия образующих моделей является обмен информацией и использование информации, полученной в результате обмена, т.е. интероперабельность. Следовательно, необходимо формирование единого информационного пространства.

Наличие единого информационного пространства ГИС позволят рассматривать распределённую ГИС как целостную структуру, наделённую всему уровнями интероперабельности (в соответствии с эталонной моделью [5,6]), а значит, в силу общности отдельных элементов ГИС:

- облегчает масштабирование программных и аппаратных решений;
- обеспечивает единство построения интегрированных средств управления проектными работами;
- способствует унификации прикладных протоколов информационной поддержки;
- обеспечивает внутреннюю и внешнюю консолидацию ГИС;
- повышает координацию процессов управления, следовательно, эффективность всего управления.

На схеме (рис. 4) показана структура единого информационного пространства ГИС. Пространство данных формируется совокупностью данных наблюдений, анализа, прогнозов и документации распределённой ГИС. Пространство математических моделей и инженерных решений формируется набором концептуальных и частных решений на аппаратном и программном уровнях. Пространство пользователей образовано множеством потребителей распределённой ГИС. Средства интероперабельности являются связующим

звенном, позволяющим находить «общий язык» на техническом и организационном уровнях.

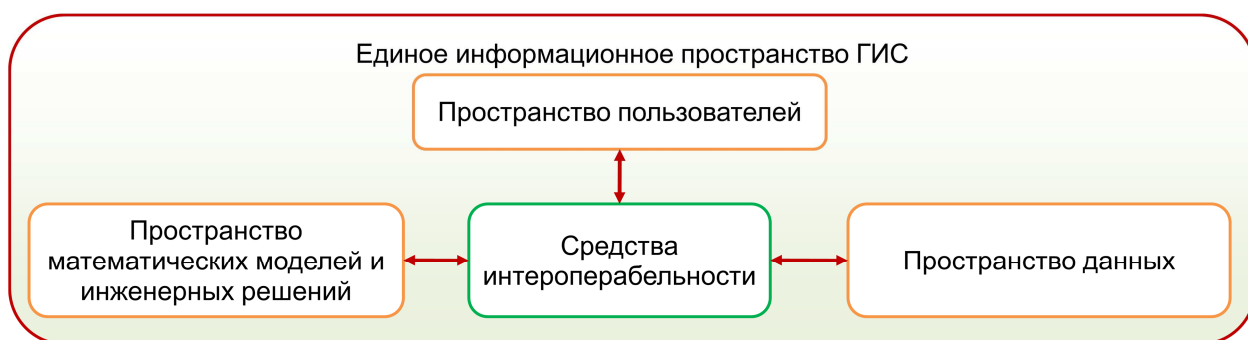


Рис. 4. Структура единого информационного пространства ГИС

Заключение

В работе произведён анализ причин и следствий недостаточности реализации принципов интероперабельности в отечественных распределённых ГИС.

Произведена разработка и внедрение средств реализации технической интероперабельности в виде модуля наборов преобразований.

Разработана информационная модель ГИС, обеспечивающая интероперабельность ГИС на техническом и организационном уровнях.

В результате работы авторами выполнено решение проблемы обеспечения технической интероперабельности, не требующее изменений на узлах ГИС, затрагивающее только ОКУ.

В рамках модернизации станций ВЗИ ИЗМИРАН и внедрения средств технической интероперабельности были разработаны и внедрены библиотеки взаимного преобразования файлов в формате *.ion, *.csv, *.md1, *.md2, *.md3, *.md4.

Ещё одним практическим результатом работы является разработка концепции единого информационного пространства распределённой ГИС. Единое информационное пространство позволяет рассматривать ГИС как целостный комплекс и является логическим следствием сделанного в работе анализа.

Литература

1. Schowengerdt R. A. Remote sensing models and methods for image processing. Third edition. Elsevier INC of 200 Wheeler Road, 6th floor, Burlington MA -1803 USA, 2007. –560 P.
2. Гришенцев А. Ю., Петрова Е. Н. Организация обмена данными по шине USB с применением электронных компонентов фирмы FTDI. Научно-технический вестник СПбГУИТМО. Выпуск 40. Изд-во. СПбГУИТМО. 2007. С.: 108–112. 290 с.
3. Гришенцев А. Ю. Способ сжатия изображения // Патент на изобретение № 2500067, опубликовано: 27.11.2013, заявка № 2012107969/08, 01.03.2012.
4. Grishentsev A., Korobeynikov A., Velichko E., Korikov S. Improvement of finite difference method convergence for increasing the efficiency of modeling in communications // International conference NEW2AN 2014 and 7th conference, ruSMART 2014 / St. Petersburg, 2014. - Iss. 14. - N 1. - P.: 591 – 597.
5. ГОСТ Р 55062–2012 Системы промышленной автоматизации и их интеграция интероперабельность // М.: Стандартиформ, – 2012, – 20 с.
6. Батоврин В. К., Гуляев Ю. В., Олейников А. Я. Обеспечение интероперабельности–основная тенденция в развитии открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы №5, 2009, С.: 7-15. – Режим доступа: http://www.jitcs.ru/images/stories/2009/05/7_15.pdf – Загл. с экрана. – Яз. рус.
7. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Проектирование и технологическая подготовка сетей станций вертикального зондирования ионосферы. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2013, № 3 (85).–С.: 61-67.
8. Piggott W.R., Rawer K. URSI handbook of Ionogram Interpretation and Reduction. INAG (Ionospheric Network Advisory Group) WORLD DATA CENTER A. National Academy of Sciences, 2101 Constitution Avenue, N.W. Washington, D.C., U.S.A., 20418. – Second edition, november, 1972. – 145 p.
9. Canadian advanced digital ionosonde. System manuals. / Scientific instrumentation limited. 2233 Hanselman Avenue Saskatoon, SK S7L 67A, Canada, 2009. – 22 p.
10. Laurini R., Yetongnon K., Benslimane D. GIS Interoperability, from Problems to Solutions // Advanced Geographic Information Systems, – Vol. II. <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C01/E6-72-05.pdf>
11. Field P.R., Rishbeth H. The response of the ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. v.59.№ 2. P.163-180. 1997.

12. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Обратная задача радиочастотного зондирования ионосферы // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2010. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct10/6/text.html>
13. Ким Ю. В. Модернизация ионосферной станции «АИС». Отчёт по теме № 690. ИЗМИРАН./ Руководитель темы Ю.В. Ким. Троицк, 2002 г. – 24 с.: ил.
14. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Программа обработки и анализа данных ионосферного спектрографа АИС-М «SkySpectrum» // ГР от 28.09.2011. – № 2011617569.
15. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Постановка задачи оптимизации распределённых вычислительных систем // Программные системы и вычислительные методы. — 2013. - № 4. - С.: 370-375.
16. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд.: СПб.: Питер, 2013. – 960 с.: ил.
17. NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC)[Electronic resource]/ – Mode of access: <http://www.ngdc.noaa.gov/>, free, by password. – Title from the screen. - Lang.Eng.
18. Microsoft. Development Network [Электронный ресурс] / – Электронная справочная система, 2014 – Режим доступа: <http://msdn.microsoft.com/>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ.
19. Stevens P., Rago C. UNIX. Advanced Programming in the UNIX Environment, Second edition. – Addison-Wesley, 2005. – 1040 с., ил.
20. Герасимов И. В., Мкртычян А. Р., Никитин А. В., Лозовой Л. Н., Кузьмин С. А. Парадигма виртуальности в автоматизированном исследовательском проектировании высокотехнологичных изделий и средств аналитического приборостроения. / Под ред. И. В. Герасимова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 205 с.: ил.
21. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. Научное издание. М.: Физматлит, 2003. – 432 с.: ил.