

## Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений

А.В. Воробьев<sup>1,2,3</sup>, Г.Р. Воробьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, 119296, Россия, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3;

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32;

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

### Аннотация

Одной из известных проблем геоинформационных программных библиотек при визуализации геопространственных данных является низкая эффективность и ограниченность покадрового изменения группы пространственных слоев с временной привязкой. Среди наиболее значимых трудностей визуализации можно отметить невозможность синхронного переключения группы пространственных слоев по временному параметру, что негативно сказывается на результатах оценки временной анизотропии соответствующих пространственных данных. Проблема усугубляется также разнородностью пространственной информации, что выражается в шагах дискретизации, форматах, используемых геопространственных примитивах. Выявленная проблема существенно затрудняет решение задач, связанных с анализом пространственно-временной информации в различных научных и прикладных областях. Ярким примером тому является решение задачи анализа пространственно-временной анизотропии геофизической информации, что с точки зрения визуализации, предполагает возможность оценки ретроспективных данных в динамическом режиме за заданный временной интервал. В работе предложен подход, позволяющий выполнить интеграцию разнородных векторных геопространственных данных для последующих обработки, анализа и визуализации. Эффективность разработанного подхода была подтверждена на примере веб-приложения, обеспечивающего визуализацию геопространственного изображения в виде комплекса пространственных полилиний произвольных данных, а также при решении задачи анализа пространственно-временных вариаций геофизических данных.

**Ключевые слова:** пространственные данные, геоинформационные технологии, геопространственное изображение, геопространственные примитивы.

**Цитирование:** Воробьев, А.В. Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 1. – С. 123-138. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1279.

**Citation:** Vorobev AV, Vorobeve GR. An approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images. Computer Optics 2024; 48(1): 123-138. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1279.

### Введение

Масштаб использования геопространственной информации во всем мире непрерывно растет. На сегодняшний день практически на всех уровнях общества признается ценность геопространственной информации, которая может играть значимую роль в развитии экономики, обеспечении жизненно важных услуг, поддержании устойчивого развития, улучшая тем самым жизнь людей во всем мире. При этом количество участников, вовлеченных в формирование, управление и сопровождение геопространственной информации, значительно выросло в последние десять лет, и этот рост продолжится и даже ускорится в ближайшие пять-десять лет [1].

Активный рост объемов геопространственной информации сопровождается развитием технологического базиса систем ее сбора, хранения, обработки,

анализа и визуализации, а также форматов ее представления. В пользу последнего свидетельствует функционирование национальных и международных организаций, ответственных за разработку стандартов описания и применения геопространственных данных (на международном уровне они находятся под руководством Открытого геопространственного консорциума (OGC) и Международной организации по стандартизации (ISO) в партнерстве со многими организациями более широких технологических стандартов для обеспечения взаимодействия) [2].

Немаловажным представляется при этом факт перехода от двумерных геопространственных изображений к трех- и четырехмерным. Такие тенденции обусловлены прежде всего интересами конечных пользователей и будут технологически поддерживаться и совершенствоваться в последующие годы. Говоря о трехмерном геопространственном изобра-

жении, представляется целесообразным отметить, что в настоящее время все чаще 3D является больше неотъемлемой частью пространственных данных, чем некоторым специфическим дополнением к ним. При этом применение четвертого измерения для геопространственных изображений все чаще наблюдается в современных геоинформационных системах, когда параметр «время» вводится в качестве дополнительного измерения, наряду с обычными  $x$ ,  $y$  и  $z$  координатами. Ожидается, что применение четырехмерных геопространственных изображений в целом призвано не только обеспечить проведение ретроспективного анализа, чтобы понять уже имевшие место изменения, но и способствовать прогностическому моделированию будущих тенденций [3]. Не только эффективное управление геопространственной информацией в реальном времени, но и эффективное архивирование данных с привязкой ко времени станет все более важным методом в управлении данными в ближайшие годы.

Основой визуального представления геопространственных данных является графическая среда, базирующаяся на векторной или растровой пространственной модели. Растровая модель описывает пространственное распределение некоторой характеристики посредством разбиения пространства регулярной сеткой ячеек, в каждой из которых фиксируется значение исследуемого параметра (количественное или качественное) [4].

Векторная модель пространственных данных предназначена для описания пространственных характеристик объектов (пары координат) и (при необходимости) их топологических отношений [5]. Важной особенностью векторной модели данных является применение исключительно геометрических примитивов (точки, полилинии, полигоны и пр.), что, в свою очередь, регламентируется стандартом OGC 06-103, разработанным консорциумом OGC [6]. При этом в векторном представлении все геометрии состоят из точек, которые, в свою очередь, являются координатами в 2-, 3- или 4-мерном пространстве и имеют одинаковую размерность. Координаты простой геометрии должны быть представлены обязательной парой координат  $X$ ,  $Y$  (широта и долгота) и могут сопровождаться дополнительными измерениями  $Z$  (высота над уровнем моря) и  $M$  (временной параметр).

Модели пространственных данных традиционно используются для визуализации данных в виде пространственных слоев – совокупности пространственных объектов, относящихся к одной теме (классу объектов) в пределах некоторой территории, и в системе координат, общих для набора слоев. Известно, что послойное или многослойное представление является наиболее распространенным способом организации пространственных данных в послойно-организованных ГИС [7]. Слои могут быть векторными или растровыми, но не могут быть основаны на

смешанной модели. При этом в случае с векторными слоями подавляющему большинству современных ГИС требуется соблюдение единообразия представленных графических примитивов для корректного отображения пространственного слоя. Это означает что, если в рамках одного и того же слоя предполагается применение нескольких видов графических примитивов, то приоритет будет отдан тому из них, который непосредственно в коде размещается ранее других. Остальные будут либо проигнорированы, либо некорректно отображены соответствующим движком ГИС.

При этом разноформатные векторные пространственные данные могут поступать из различных источников, а также являться результатом наблюдения/мониторинга несхожих процессов и явлений различной природы происхождения. В этом случае возникает задача формирования интегрированного набора пространственных данных одного и того же формата, заданного набором графических примитивов одного и того же типа. При этом существующие программные инструменты обработки геопространственных данных не предполагают процедуру слияния (merge) разноформатных данных. Для этого необходимо определить правила взаимной трансформации графических примитивов векторной пространственной модели, которые должны обеспечить отображение пространственных данных без ущерба для связанной с ними атрибутивной информации.

Представляется целесообразным также отметить технические сложности пространственной 4-мерной визуализации, обусловленные различным шагом дискретизации для временного атрибута пространственных данных, которые поступают из различных источников и / или ориентированы под решение специфических прикладных задач. В этом случае возникает дополнительная задача, связанная с унификацией шага дискретизации и единиц измерения временного параметра соответствующего интегрированного набора пространственных данных для его последующего рендеринга на базовой картографической подложке.

Перечисленные проблемы создают значимые препятствия при решении научных и прикладных задач в различных областях деятельности. Одним из примеров тому является анализ характера изменения во времени и пространстве разнородной геофизической информации, как получаемой в ходе наблюдений с использованием соответствующих средств регистрации геофизических процессов / явлений, так и являющейся результатом эмпирических исследований на основе известных математических моделей, используемых при решении соответствующих задач. Так, в настоящее время практикуется исследование характеристик полярных сияний в области аврорального овала, основанное исключительно на анализе статичных данных, имеющих жесткую привязку к параметрам даты и времени. В общем виде такие данные могут быть представлены в виде так называемых мо-

ментальных снимков, характеризующих исследуемые параметры в конкретный момент времени. При этом остается нерешенной задача, позволяющая охарактеризовать временную анизотропию соответствующих процессов. Ее решение усложняется и разнообразием исследуемых характеристик, данные по которым поступают из разнородных источников, имеют разный шаг дискретизации и описываются различными геопространственными примитивами. Существующие сервисы и программные решения лишь частично решают поставленную задачу, при этом на пользователя ложится дополнительная нагрузка, связанная с самостоятельным набором серии моментальных снимков за искомый временной период. Если же требуется в едином моментальном снимке интегрировать несколько геофизических характеристик в одном геопространственном изображении, то задача зачастую становится практически нерешаемой.

Другим примером задачи, решение которой также во многом сопряжено с обеспечением возможности динамической визуализации разнородных данных, является визуализация и анализ на этой основе так называемой геомагнитной информации. Она формируется, с одной стороны, на основании точечных наблюдений наземных магнитных обсерваторий и вариационных станций, а также на базе известных математических моделей, обеспечивающих расчет параметров невозмущенного геомагнитного поля, с другой. Вместе с тем искомые данные доступны из разных источников, некоторые из которых предоставляют атрибутивные значения с привязкой к геопространственной точке, другие – в форме атрибутивных значений с привязкой к геопространственной полилинии и т.д. Перечисленные факторы затрудняют анализ пространственно-временной анизотропии геомагнитных данных.

Таким образом, в общем виде задача декомпозируется на две подзадачи. С одной стороны, необходимо разработать и реализовать подход, который обеспечивает формирование единого набора пространственных данных (двух- или трехмерного представления некоторого процесса / явления) из гетерогенных данных с различными наборами графических примитивов, базирующихся на векторной пространственной модели. С другой стороны, необходимо дополнить сформированный интегрированный 2D/3D-пространственный слой временным параметром с заданным шагом дискретизации в единых единицах измерения.

Немаловажно при разработке новых решений при этом придерживаться требований к пространственно-временным моделям, сформулированным, в частности, следующим образом [1]. В первую очередь, модель должна обеспечивать возможность описания некоторого объекта / явления / процесса в терминах его пространственной локализации, с одной стороны, и изменения во времени, с другой. В зависимости от конкретной решаемой прикладной задачи простран-

ственно-временная модель должна обеспечивать две точки зрения: фиксированную геопозицию для анализа временной динамики процесса и фиксированную временную метку для формирования так называемых моментальных пространственных снимков (snapshot). При этом при отслеживании пространственной или временной динамики целесообразно манипулировать как дискретными, так и непрерывными изменениями соответствующих атрибутов. Кроме того, необходимо отметить способность организации пространственно-временных данных в слои для последующего рендеринга на базовой картографической подложке, что, в свою очередь, сопряжено с представлением данных посредством распространенных на сегодняшний день форматов (например, GeoJSON).

### 1. Состояние вопроса

Основой четырехмерной визуальной интерпретации геопространственных данных является соответствующая пространственно-временная модель, которая предполагает применение специфических методов доступа, хранения и пространственного анализа и позволяет отслеживать изменение во времени процессов и явлений различной природы происхождения.

Первая пространственно-временная модель Dengermon Snapshot была предложена в 1980-х гг. и предполагала явное разделение на пространственную и временную составляющие. В рамках модели Snapshot каждый пространственный слой представляет собой совокупность однородных во времени единиц пространственных данных. Фактически посредством указанной модели возможно показать так называемые «моментальные снимки» слоев в заданный момент времени, при этом допускается отсутствие временной преемственности между последовательными наборами пространственных данных (временные интервалы между любыми двумя пространственными слоями могут отличаться). Основными недостатками модели Snapshot являются избыточность и временная несогласованность визуализируемых пространственных данных [8].

В дальнейшем модели были ориентированы уже на интеграцию указанных составляющих в единую компоненту. Так, составная пространственно-временная модель данных (Space-time Composite Data Model) обеспечивает формирование набора однородных во времени и двумерном пространстве объектов в виде совокупности пространственных композиций, каждая из которых уникальным образом описывает темпоральное изменение значений атрибутивных параметров пространственных данных. Модель ориентирована на векторное описание пространственных данных, при этом ее базовым графическим примитивом является полигон. Интеграция пространственно-временных параметров концептуально описывает изменение состояния пространственного объекта (процесса, явления) в течение определенного временного

интервала, заданного дискретными значениями. Основным недостатком модели является то, что с ее помощью невозможно отследить темпоральность (изменение во времени) пространственных атрибутов, т.е. варьируется только временной параметр при фиксированных значениях пространственных параметров [9].

Еще одно известное решение – событийно-ориентированная модель (Event Oriented Spatio-Temporal Data Model (ESTDM)) – предназначено для хранения и представления пространственных слоев в виде временной последовательности. Модель ESTDM хранит изменения по отношению к предыдущему состоянию атрибутивных данных, а не к моментальному снимку экземпляра. Основными компонентами модели ESTDM являются базовая карта, заголовочные файлы и события. Каждый заголовочный файл содержит информацию об определенной области (thematic domain), ссылку на базовую карту, а также указатели на первый и последний элементы перечня событий. На базовой карте представлен исходный (стартовый) моментальный снимок пространственных данных в заданной географической области. При этом каждое событие имеет временную отметку и связано со списком компонентов события для определения момента наступления изменений [10].

Трехкомпонентная модель пространственных данных (Three Domain Data Model) представлена тремя обособленными составляющими, которые характеризуют соответственно семантическую, геопространственную и временную составляющие данных. Семантическая составляющая при этом используется для однозначного описания атрибутивных значений данных в терминах соответствующей предметной области в форме совокупности вида «объект – субъект – свойство». Пространственная составляющая задана векторными геопространственными примитивами (преимущественно при этом используются пространственные полигоны), связанными с семантическим компонентом соединением по типу «ключ – значение». Аналогичная связь характерна и для временной составляющей, представленной соответствующими временными метками и описывающими темпоральное изменение атрибутивных значений данными (по объекту / процессу / явлению). Важным преимуществом модели является возможность представления как временной, так и пространственной анизотропии некоторого явления. При этом указанная модель позволяет как зафиксировать пространственную «точку зрения» и рассмотреть временные изменения в соответствующем геопространственном регионе (мгновенные снимки (snapshot)), так и отследить пространственные вариации в течение заданного временного интервала [11].

Модель движущегося объекта (The Moving Object Data Model) отличается от перечисленных выше решений тем, что позволяет отследить не только дис-

кретное изменение пространственных данных во времени, но и непрерывное изменение геопространственной геометрии (в частности, положения объекта) в пространстве (так называемые «движущиеся объекты»). Основным элементом такой модели является траектория, которая характеризуется изменением расположения пространственного объекта во времени. При этом временная составляющая является неотъемлемым атрибутом пространственных данных, что предполагает применение линейной непрерывной модели изменения времени от заданной временной точки [12].

Модель Geotoolkit [13] отличается от всех перечисленных ранее моделей тем, что пространственные данные рассматриваются в трехмерном формате (пара координат вида «широта – долгота», а также дополнительный параметр – высота над уровнем моря). Любой пространственный объект в модели Geotoolkit может быть смоделирован либо непосредственно одним из встроенных пространственных классов, либо как композиция этих классов внутри группы. Группа при этом представляет собой разнородный набор пространственных объектов, которые в дальнейшем рассматриваются как единый объект. Важно, что сама модель Geotoolkit является объектно-ориентированной, что позволяет создавать новые классы пространственных объектов из уже существующих, комбинируя их свойства и методы в составе единого объекта.

Целесообразно сравнить перечисленные пространственно-временные модели с двух основных позиций. Одна из них – возможность выполнения пространственно-временных запросов для решения прикладных задач на основе соответствующих наборов данных. При этом запросы условно могут быть разделены на три группы: пространственные, временные и пространственно-временные. Исследования показали, что при выполнении пространственных запросов геостатистические функции (определение расстояния, поиск ближайшей точки и пр.) доступны только на уровне трехдоменной модели, модели движущегося объекта, а также модели Geotoolkit. Простые временные запросы реализуются всеми рассмотренными моделями, в то время как комплексные запросы доступны только событийно-ориентированной, трехдоменной и модели Geotoolkit. Аналогичное заключение можно сделать и касательно пространственно-временных запросов: в отличие от простых (атомарных) запросов комплексные запросы поддерживаются только событийно-ориентированной, трехдоменной и моделью Geotoolkit.

Вторым критерием анализа является размерность, которую поддерживают пространственно-временные модели. Как показали исследования, большинство известных пространственно-временных моделей ориентированы для применения на уровне плоских виртуальных карт (формат 2D). Исключение составляет только модель Geotoolkit, которая обеспечивает воз-

возможность альтернативной геопространственной визуализации – на уровне виртуального глобуса (формат 3D). Трехмерные геоинформационные модели и технологии позволяют изучать трехмерный рельеф с любых точек зрения, городские сооружения и инфраструктуру, визуализировать проектируемые здания, планировать развитие территорий, производить оценку высотных характеристик, области видимости, проводить визуальный анализ. Кроме того, все перечисленные решения ориентированы на визуализацию в виде слоя единственного набора однотипных пространственных данных и не подразумевают работу с их множественными разнородными источниками.

В дополнение здесь представляется целесообразным отметить несколько известных в мировом научном сообществе проектов, направленных на трансформацию геопространственной информации для последующей интеграции разнородных данных. Одним из таких примеров является исследование по разработке единого геоинформационного решения для разнородных геопространственных данных по объектам административного назначения. Указанное решение основано на применении принципов онтологического подхода и предполагает построение RDF-объектов из исходной геопространственной информации [14].

Еще одним примером является подход, основанный на применении машинного обучения для преобразования векторных примитивов [15]. Данное решение направлено на векторизацию технических чертежей, таких как планы этажей, архитектурные чертежи и 2D-изображения САПР. Метод предполагает применение глубокого обучения для устранения фона и дефектов изображения, а также последующую трансформацию на основе нейронной сети.

Кроме того, известен подход, решающий задачу трансформации систем геопространственных координат [16]. Предложенная при этом модель основана на совместной корректировке наблюдаемых координат методом наименьших квадратов с использованием их полной стохастической модели по всем интересующим точкам.

Значительное количество работ по геопространственной трансформации связано с преобразованием используемых проекций. Так, к примеру, в исследовании [17] рассматривается модель преобразования проекций Гаусса–Крюгера и Меркатора на основании метода преобразования Гельмерта. В исследовании [18] показано, как при помощи операций трансформации преобразовывать локальные координаты моделей зданий в географические координаты. При этом преобразование координат требует специальных геодезических знаний, особенно в части, которая относится к выбору моделей и параметров преобразования, так как это влияет на точность преобразованных координат.

Анализ показал, что общим недостатком перечисленных решений по трансформации геопростран-

ственной информации с целью интеграции данных является их узкая прикладная направленность: в подавляющем большинстве случаев они применимы только в конкретной предметной области и не предусматривают расширение за ее пределы. Кроме того, решения не покрывают всех выявленных проблем, ориентируясь только на их часть: координатные системы, проекции и пр.

Таким образом, необходимо решение задачи пространственно-временной (4-мерной в случае наличия z-координаты и 3-мерной при ее отсутствии) визуализации данных, полученных из разных источников и подразумевающих различные семантику и топологию, однако при этом идентифицируемых геоинформационными системами и библиотеками в виде единого интегрированного пространственного слоя, доступного для визуализации и геостатистического анализа.

## 2. Формализация задачи

Пространственно-временная модель (Spatial Temporal Model, STM) объекта / явления / процесса представляет собой совокупность нескольких компонент:

$$STM = \{g_1 a_1 t_1, g_2 a_2 t_2, \dots, g_n a_n t_n\}, \quad (1)$$

где  $g_i$  – пространственная геометрия с соответствующими атрибутивными значениями  $a_i$  анализируемого объекта в момент времени  $t_i$ .

В рамках рассматриваемой модели временной параметр соответствует мгновенному измерению времени. Для моделирования и анализа изменений пространственного объекта с течением времени возможна упрощенная интерпретация представленной совокупности компонент с учетом соответствующих атрибутивных параметров.

В качестве единицы пространственной геометрии предлагается рассматривать атомарную точку  $p$ , заданную координатами широты и долготы ( $x$  и  $y$  соответственно), а также (опционально) высоты над уровнем моря ( $z$ ):

$$p = \{x, y, (z)\}. \quad (2)$$

Соответственно, полилиния представляет собой последовательность точек вида:

$$l = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} = \left\{ \left\{ \{x_1, y_1, (z_1)\}, \{x_2, y_2, (z_2)\}, \dots, \{x_n, y_n, (z_n)\} \right\}_1, \dots \right\}. \quad (3)$$

Тогда пространственный полигон в общем случае можно представить в виде совокупности пространственных полилиний:

$$r = \{l_1, \dots, l_n\} = \left\{ \left\{ \left\{ \{x_1, y_1, (z_1)\}, \dots, \{x_n, y_n, (z_n)\} \right\}_1, \dots \right\}_1, \dots \right\}. \quad (4)$$

Ввиду разнообразия геометрий векторного пространственного изображения представляется целесообразным дополнить выражение (1) параметром, характеризующим тип используемого графического примитива, следующим образом:

$$STM = \{g_1 a_1 t_1, g_2 a_2 t_2, \dots, g_n a_n t_n, f\}, \quad (5)$$

где  $f$  – тип используемого заданным пространственным набором данных графического примитива.

Введение дополнительного параметра в модель представляется целесообразным, поскольку современные геоинформационные системы и технологии ориентированы преимущественно на работу с пространственными слоями, заданными геопространственными примитивами одного типа. В отдельных случаях возможно применение принципа «группа слоев», однако доступные решения при этом ограничены простой визуализацией без функций геостатистического анализа и обработки (принцип группы слоев также недоступен в случае работы с трехмерными пространственными изображениями – виртуальными глобусами).

Для корреляции предложенного формата представления данных с возможностями геоинформационных систем и технологий представляется целесообразным ограничить допустимый домен значений атрибута  $f$  основными доступными геопространственными примитивами:

$$f = \{ 'p', 'l', 'r' \}, \quad (6)$$

где для обозначения типа примитива используются соответственно 'p' – для точек, 'l' – для полилиний, 'r' – для полигонов. Для иных пространственных объектов возможно составление комплексного типа из трех доступных представленных вариантов геопространственных примитивов (такие ситуации являются скорее исключением, поскольку при решении прикладных задач работа, как правило, ведется одновременно с данными одной пространственной геометрии).

Предназначенный для визуализации и анализа пространственный слой в большинстве случаев нацелен на описание распределения атрибутов некоторого объекта/явления/процесса в определенном пространственном регионе (в том числе по всей поверхности земного шара) и представляет собой множество графических примитивов (точки, полилинии, полигоны и пр.). Поступающие из различных источников пространственные данные могут быть заданы различными геопространственными примитивами, в целом создавая общую картину пространственного (или пространственно-временного) распределения одного или нескольких атрибутивных значений исследуемого объекта / явления / процесса. При этом различаться могут не только состав пространственных графических примитивов, но и шаг дискретизации.

В общем виде обозначенную проблему можно описать следующим образом. Пусть  $X$  – набор пространственных данных, поступивший от источника данных  $A$  и заданный набором  $N$  пространственных точек в виде временной последовательности с шагом  $t_1$ ,  $Y$  – набор пространственных данных, поступивший от источника данных  $B$  и заданный набором  $M$  пространственных полилиний в виде временной последовательности с шагом  $t_2$ :

$$\begin{aligned} X &= \{ p_1 a_1 (t_0 + t_1), p_2 a_2 (t_0 + 2t_1), \dots, \\ & p_N a_N (t_0 + N \cdot t_1) \} : p_i = \{ x_i, y_i, z_i \}, i = 1, \dots, N, \\ Y &= \{ l_1 a_1 (t_0 + t_2), l_2 a_2 (t_0 + 2t_2), \dots, l_M a_M (t_0 + M \cdot t_2) \} : \\ l_j &= \{ \{ x_1, y_1, z_1 \}, \{ x_2, y_2, z_2 \}, \dots, \{ x_L, y_L, z_L \} \}, \\ j &= 1, \dots, M, L \in \mathbb{N}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $t_0$  – начальный момент времени для всех данных, независимо от их источника;  $N$  – множество целых чисел.

Формирование пространственного слоя на основании представленных наборов пространственных данных предполагает интеграцию  $X$  и  $Y$  таким образом, чтобы перейти к обобщенному слою от группы слоев с единым шагом дискретизации и однотипными графическими примитивами без потери атрибутивной информации, для оценки пространственно-временного распределения которой и должна быть выполнена указанная процедура. Соответственно, необходим механизм, обеспечивающий, с одной стороны, унификацию шага дискретизации по времени, и трансформацию пространственных графических примитивов в пространстве, с другой.

Иными словами, для наборов пространственных данных  $X$  и  $Y$  имеет место соотношение следующего вида:

$$X \cup Y = \left\{ \left\{ p_1 a_1 t_1, p_2 a_2 t_2, \dots, p_D a_D t_D, 'p' \right\}, \left\{ l_1 a_1 t_1, l_2 a_2 t_2, \dots, l_D a_D t_D, 'l' \right\} \right\}, \quad (8)$$

$$D = c \cdot N = e \cdot M,$$

где  $t_i$  ( $i = 1, \dots, D$ ) – обобщенный временной параметр, интегрирующий шаги дискретизации для наборов данных  $X$  и  $Y$  с коэффициентами  $c$  и  $e$  соответственно.

Как следует из (8), интеграция двух наборов пространственных данных не приводит к формированию единого пространственного слоя, а представляет собой так называемую группу слоев, каждый элемент которой задан графическими примитивами определенного, не совпадающего с другими типа (в рассматриваемом случае группа слоев представлена пространственными точками и полигонами). При этом, как говорилось выше, эффективное управление группой слоев с привязкой ко временному параметру технически невозможно или сопряжено с появлением разнородных пространственных артефактов, что су-

щественно снижает возможности разработчиков ответствующих информационных систем.

Известно, что по умолчанию подавляющее большинство программных библиотек и инструментально-программных средств применяют к группе слоев принцип приоритетного пространственного графического примитива (например, такой механизм реализуют программные модели и методы прикладного программного интерфейса ArcGIS API for JavaScript [19]. В этом случае интерпретатор считывает первый декларируемый в группе слоев тип пространственных данных (в нашем случае таковым является «пространственная точка») и применяет правила его обработки и визуализации ко всем представленным в интегрированном наборе пространственным данным. Это, в свою очередь, может привести к невозможности рендеринга финального пространственного изображения в заданной картографической проекции, с одной стороны, а также приводит к разнообразным артефактам, искажающим сформированное геопространственное изображение, с другой.

Поскольку задача формирования единого временного интервала из нескольких доступных, в том числе заданных в различных единицах измерения, является известной и тривиальной, то ее решение при формировании интегрированного слоя из множества наборов разнородных пространственных данных может быть выполнено посредством применения существующих программных библиотек и / или инструментально-программных средств. Несколько иначе позиционируется ситуация, обусловленная необходимостью приведения к единому виду (формату) пространственных данных с различными используемыми геопространственными геометриями. Соответственно решение именно указанной задачи представляется базой для всех последующих операций (в том числе геостатистических) для интеграции и визуализации разнородных пространственных данных.

Здесь и далее для наглядности представляется целесообразным рассматривать процедуру дуплексной трансформации геопространственных геометрий в виде соответствующих функций отображения (по сути отображения одной геопространственной структуры в другую). Ранее были выделены три основных используемых в геоинформационных системах графических примитива (соответственно геопространственные точка  $p$ , полилиния ( $l$ ) и полигон ( $r$ )), следовательно, в общем виде задачу можно рассматривать как формирование шести функций отображения выделенных графических примитивов.

Сказанное можно формализовать следующим образом:

$$\begin{aligned} f_{pl} &= p \rightarrow l; \\ f_{pr} &= p \rightarrow r; \\ f_{lp} &= l \rightarrow p; \\ f_{lr} &= l \rightarrow r; \\ f_{rp} &= r \rightarrow p; \\ f_{rl} &= r \rightarrow l; \end{aligned} \quad (9)$$

где  $p, l, r$  – произвольные геопространственные точка, полилиния и полигон соответственно.

Иными словами, в общем виде задача формирования четырехмерных геопространственных изображений из разнородных пространственных данных может быть декомпозирована следующим образом. На первом этапе необходимо привести все данные к единому шагу дискретизации, для чего требуется определить правила преобразования соответствующих временных интервалов с учетом используемых при этом единиц измерения, которые, в свою очередь, могут различаться. На втором (опциональном) этапе необходимо привести обрабатываемые пространственные данные к единой системе координат, поскольку поступающие из различных источников данные не обязательно представлены в одной и той же системе координат (к примеру, в ряде связанных с геофизическими исследованиями прикладных областей могут быть применены не только географическая, но, в частности, и геомагнитная системы координат). В случае единства используемых систем координат данный этап пропускается. Далее выделяются все используемые в рамках обрабатываемых данных геопространственные примитивы, выявляются правила их трансформации и приведения к единому графическому примитиву для формирования интегрированного пространственного слоя. Результат применения обозначенных правил передается конечному пользователю или программе для выполнения последующих операций по обработке, анализу и визуализации с учетом проведенных манипуляций.

### 3. Формализация операций трансформации данных

Наибольшую сложность с точки зрения применения известных подходов и решений представляет задача трансформации одних геопространственных примитивов в другие, используемые в предполагаемом интегрированном пространственном слое. Здесь представляется целесообразным предложить и формализовать трансформационные решения, отражающие соответственно функции отображения геопространственных примитивов, представленные выражением (9).

Простейшим вариантом трансформации является случай, когда геопространственные примитивы в интегрированном пространственном слое должны быть представлены совокупностью геопространственных точек. В этом случае необходимы правила и программные механизмы трансформации двух оставшихся геопространственных примитивов (полилиния и полигон) в точку. Очевидным решением здесь представляется декомпозиция обозначенных примитивов на пространственные точки, из которых они составлены. Важно при этом на финальном этапе устранить дубликаты пространственных точек, что может иметь место в случае декомпозиции замкнутых полилиний и соответствующих полигонов. Также представляется целесообразным отметить, что значение атрибута при декомпозиции

должно быть продублировано для каждой пространственной точки, выделенной из более сложного геопространственного примитива.

Для формализации сказанного выше представляется целесообразным использовать следующие соотношения. Пусть наборы пространственных данных  $X$  и  $Y$  заданы геопространственными примитивами двух типов: соответственно пространственные точка и полилиния. При этом данные характеризуют изменение в пространстве некоторого атрибутивного значения  $a$  с шагом дискретизации соответственно  $t_1$  и  $t_2$  (7). Интеграция наборов пространственных данных в группу слоев определена введением единого шага дискретизации, масштабирующего заданные временные интервалы  $t_1$  и  $t_2$  соответственно (8). Задача формирования единого пространственного слоя из полученной группы слоев в итоге должна быть сведена к применению в составе каждого из исходных данных единого геопространственного примитива, к примеру, пространственной точки, где правило трансформации в общем виде задано функцией:

$$f_{lp} = l \rightarrow p = \{lat\} \rightarrow \{pat\} : p = \{x, y, (z)\};$$

$$l = \left\{ \left\{ x_1, y_1, (z_1) \right\}, \dots, \left\{ x_n, y_n, (z_n) \right\} \right\}, n \in \mathbb{N}. \quad (10)$$

Результатом очевидной операции преобразования пространственной полилинии в набор пространственных точек является следующее выражение:

$$l_T = \left\{ x_1, y_1, (z_1) \right\}, \dots, \left\{ x_n, y_n, (z_n) \right\}, \quad (11)$$

где  $l_T$  – трансформированная полилиния, полученная в результате декомпозиции на пространственные точки.

Поскольку в исходном варианте атрибутивные и временные параметры были привязаны к пространственной полилинии в целом, при декомпозиции полилинии на точки необходимо выполнить соответствующее их перераспределение вида:

$$l_T = \left\{ x_1, y_1, (z_1), a_1, t_1 \right\}, \dots, \left\{ x_n, y_n, (z_n), a_1, t_1 \right\}, \dots,$$

$$\left\{ x_1, y_1, (z_1), a_D, t_D \right\}, \dots, \left\{ x_n, y_n, (z_n), a_D, t_D \right\}, \quad (12)$$

где  $t_i (i=1, \dots, D)$  – обобщенный временной параметр, интегрирующий шаги дискретизации для наборов данных  $X$  и  $Y$  с коэффициентами  $c$  и  $e$  соответственно.

В случае, если исходные наборы пространственных данных  $X$  и  $Y$  представлены пространственными точками и полигонами, то соответствующее преобразование группы слоев в интегрированный слой (с пространственной точкой в качестве геопространственного примитива) выполняется аналогично:

$$f_{rp} = r \rightarrow p = \{rat\} \rightarrow \{pat\} : p = \{x, y, (z)\};$$

$$r = \left\{ \left\{ \left\{ x_1, y_1, (z_1) \right\}, \dots, \left\{ x_n, y_n, (z_n) \right\} \right\}_1, \dots, \left\{ \left\{ x_1, y_1, (z_1) \right\}, \dots, \left\{ x_n, y_n, (z_n) \right\} \right\}_m \right\}, \quad (13)$$

$$m, n \in \mathbb{N}.$$

Результатом операции преобразования пространственного полигона в набор пространственных точек является следующее выражение:

$$r_T = \left\{ x_1^l, y_1^l, (z_1^l) \right\}, \dots, \left\{ x_n^m, y_n^m, (z_n^m) \right\}, m, n \in \mathbb{N}, \quad (14)$$

где  $r_T$  – трансформированный полигон, полученный в результате декомпозиции на пространственные точки.

Аналогично (12), поскольку в исходном варианте атрибутивные и временные параметры были привязаны к пространственному полигону в целом, при декомпозиции полигона на точки необходимо выполнить соответствующее их перераспределение вида:

$$r_T = \left\{ x_1^l, y_1^l, (z_1^l), a_1, t_1 \right\}, \dots, \left\{ x_n^m, y_n^m, (z_n^m), a_1, t_1 \right\}, \dots,$$

$$\left\{ x_1^l, y_1^l, (z_1^l), a_D, t_D \right\}, \dots, \left\{ x_n^m, y_n^m, (z_n^m), a_D, t_D \right\}, \quad (15)$$

$$m, n \in \mathbb{N},$$

где  $t_i (i=1, \dots, D)$  – обобщенный временной параметр, интегрирующий шаги дискретизации для наборов данных  $X$  и  $Y$  с коэффициентами  $c$  и  $e$  соответственно.

Другой вариант трансформации геопространственных данных предполагает использование пространственной полилинии в интегрированном пространственном слое. Пространственная полилиния является базовым геопространственным примитивом и реализуется известными геоинформационными системами и технологиями, включая программные библиотеки. С точки зрения формата описания пространственных данных пространственная полилиния, как правило, имеет атрибут «LineString» в своих метаданных, как это наблюдается, к примеру, в формате GeoJSON, ставшем стандартом де-факто для представления геопространственной информации в виде пространственных слоев [20].

В этой связи и с учетом функций трансформации (9) возникают ситуации, когда необходимо и обратное преобразование, предполагающее формирование из пространственной точки соответствующей пространственной полилинии или пространственного полигона. В этом случае представляется целесообразным формализовать следующие соотношения. Пусть имеется пространственная точка  $p$ , заданная тройкой геопространственных координат  $(x, y, z)$  с атрибутивным параметром  $a$ , значение которого определено в момент времени  $t$ . Иными словами, имеет место соотношение типа

$$p = \{x, y, z, a, t\}. \quad (16)$$

Задача преобразования указанной пространственной точки в пространственную полилинию в общем виде сводится к построению полилинии, состоящей из двух совпадающих друг с другом точек с геопространственными координатами  $(x, y, z)$ . Сказанное представляется целесообразным формализовать посредством следующего соотношения:



$$f_{pl} = p \rightarrow l : p = \{x, y, z, a, t\};$$

$$l = \{p, p\} = \{\{x, y, z\}, \{x, y, z\}, a, t\}. \quad (17)$$

Аналогичным образом может быть выполнена трансформация геопространственной точки в геопространственный полигон. Как правило, геопространственный полигон должен быть представлен как минимум тремя пространственными точками, первая и последняя из которых совпадают:

$$r = \{p_1, \dots, p_n, a, t\} : p = \{x, y, z\}; n \geq 3; p_1 = p_n. \quad (18)$$

Соответственно задача трансформации геопространственной точки  $p$  в этом случае сводится к формированию пространственного полигона с тремя одинаковыми точками  $p$ , что может быть выражено посредством следующего соотношения:

$$f_{pr} = p \rightarrow r : p = \{x, y, z, a, t\};$$

$$r = \{p, p, p\} = \{\{x, y, z\}, \{x, y, z\}, \{x, y, z\}, a, t\}. \quad (19)$$

Для завершения обсуждения преобразований (9) необходимо рассмотреть еще два типа преобразований геопространственных примитивов, которые предполагают взаимное преобразование пространственных полилиний и полигонов. Для формализации рассматриваемых преобразований рассмотрим полилинию  $l$ , заданную двумя пространственными точками с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  соответственно с атрибутивным параметром  $a$ , значение которого определено в момент времени  $t$ :

$$l = \{\{x_1, y_1, z_1\}, \{x_2, y_2, z_2\}, a, t\}. \quad (20)$$

Необходимо обеспечить построение полигона  $r$  из заданной полилинии, сохранив атрибутивные и временные параметры. Известно, что пространственный полигон должен быть задан минимум тремя пространственными точками, первая и последняя из которых совпадают. Если применить такое свойство полигонов к поставленной задаче, то ее решение может быть сведено к формированию пространственного полигона, первые две точки которого совпадают с исходной полилинией, а последняя точка дублирует первую. Атрибутивные и временные параметры переносятся без изменений, относясь в новом варианте к целому полигону. При этом одна пространственная полилиния может быть преобразована только в один пространственный полигон.

Сказанное можно продемонстрировать следующим соотношением:

$$f_{lr} = l \rightarrow r :$$

$$r = \{\{x_1, y_1, z_1\}, \{x_2, y_2, z_2\}, \{x_1, y_1, z_1\}, a, t\}. \quad (21)$$

Рассмотрим вариант преобразования пространственного полигона в полилинию. Пусть задан про-

странственный полигон  $r$ , определенный тремя парами пространственных координат  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$  и  $(x_3, y_3, z_3)$  соответственно (при этом согласно требованиям к пространственным полигонам  $(x_1, y_1, z_1) = (x_3, y_3, z_3)$ ) с атрибутивным параметром  $a$ , значение которого определено в момент времени  $t$ :

$$r = \{\{x_1, y_1, z_1\}, \{x_2, y_2, z_2\}, \{x_3, y_3, z_3\}, a, t\} =$$

$$= \{\{x_1, y_1, z_1\}, \{x_2, y_2, z_2\}, \{x_1, y_1, z_1\}, a, t\}. \quad (22)$$

Требуется преобразовать заданный пространственный полигон в пространственную линию. Для решения поставленной задачи воспользуемся свойством полилинии, предполагающим, что указанный геопространственный примитив должен состоять как минимум из двух пространственных точек. Это позволяет разделить исходный пространственный полигон на три пространственных полилинии, последовательно соединяющие пары исходных точек. Первая пространственная полилиния должна быть составлена из первых двух точек полигона, вторая – соответственно из второй и третьей точек, а последняя – из первой и последней соответственно. При этом исходные атрибутивные и временные параметры дублируются для каждой выделенной пространственной полилинии.

Сказанное в общем виде можно представить следующим образом:

$$f_{rl} = r \rightarrow l : l = \{\{x_1, y_1, z_1\}, \{x_2, y_2, z_2\}, a, t\};$$

$$l_1 = \{\{x_2, y_2, z_2\}, \{x_1, y_1, z_1\}, a, t\}; \quad (23)$$

$$l_3 = \{\{x_1, y_1, z_1\}, \{x_1, y_1, z_1\}, a, t\}.$$

Аналогичные преобразования (декомпозиция на пары точек) могут быть применены к пространственным полигонам с любым числом точек.

Таким образом, в приведенных выражениях были представлены варианты трансформации одних геопространственных примитивов в другие без потери значений атрибутивных параметров с учетом их пространственно-временной привязки. Возникающая в некоторых ситуациях избыточность геопространственных объектов может быть компенсирована особенностями их визуализации на картографической подложке, в частности, управлением видимостью, цветовой схемой, начертанием и пр.

Резюмируя, представляется целесообразным отметить, что приведенные выражения могут быть использованы для геопространственных примитивов с любым количеством составляющих (в частности, пространственных точек). Кроме того, сочетание обозначенных выражений может быть использовано для приведения к единому представлению сложных геопространственных объектов, которые, фактически не являясь группой пространственных слоев, предполагают наличие в своем составе геопространственных

примитивов сразу нескольких типов (что допускается большинством форматов представления геопространственной информации, в частности, GeoJSON, но слабо поддерживается геоинформационными системами и инструментально-программными средствами (и библиотеками)).

#### 4. Алгоритм решения

В общем виде предложенные решения по формированию интегрированного слоя из группы разнородных пространственных слоев можно представить следующим образом (рис. 1). Процесс инициируется получением входных данных, в качестве которых выступают наборы (слои) геопространственных данных с временной привязкой с различными геопространственными графическими примитивами.

Кроме того, на начальном этапе выполнения предложенного алгоритма должны быть определены его базовые настройки. Таковыми являются два основных параметра, определяемые потребителями программного интерфейса в зависимости от субъективных условий, а также специфики конкретных прикладных областей и решаемых при этом задач. Требуется инициализация шага дискретизации по времени, что позволит на последующих шагах осуществить необходимые преобразования для формирования сводного набора данных с соответствующим временным интервалом. Кроме того, должен быть указан один из трех типов геопространственных графических примитивов (точка, полилиния и полигон), который будет использован в результирующем пространственном слое.

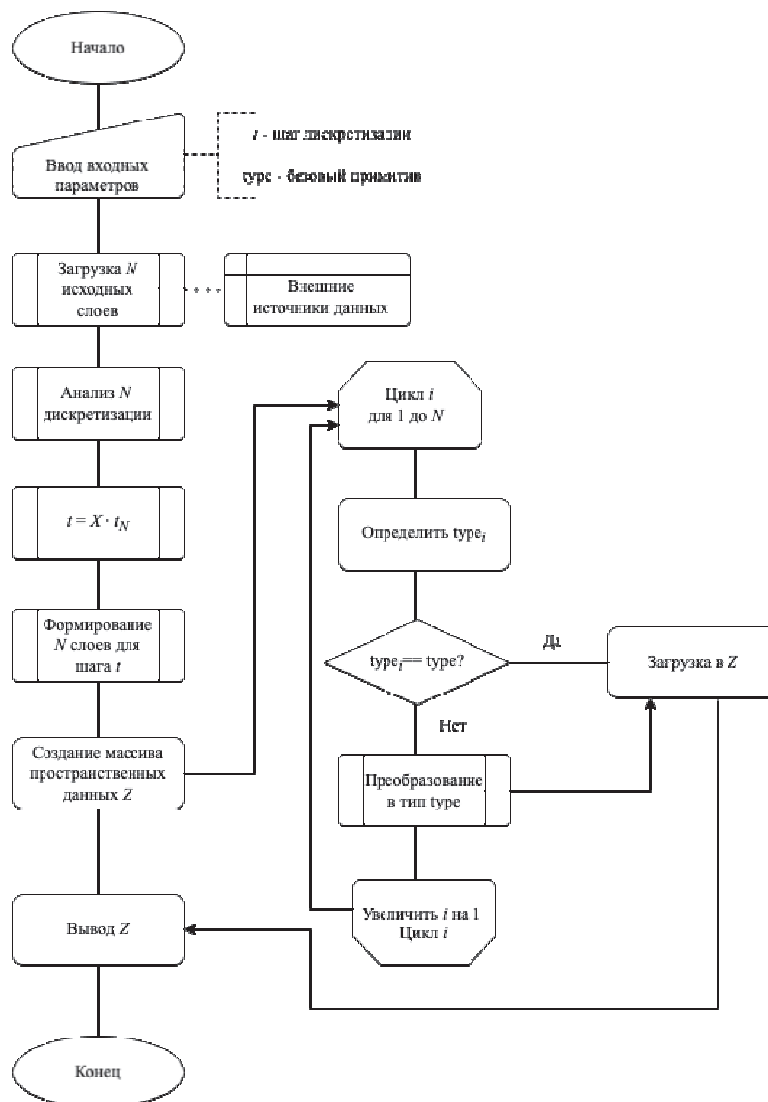


Рис. 1. Схема алгоритма формирования интегрированного пространственного слоя

Каждый набор исходных пространственных данных представляет собой отдельный элемент сводного многомерного массива. Цикл по указанному массиву позволяет оценить имеющийся в исходных данных шаг дискретизации и определить необходимость

осуществления соответствующих преобразований. Каждый известный шаг дискретизации  $t_i$  для  $i = 1, \dots, N$  источников данных оценивается с точки зрения двух аспектов. Во-первых, рассматривается единица измерения времени для анализируемого

набора данных и при необходимости осуществляется ее преобразование к той размерности, которая была задана при выборе обобщенного шага дискретизации. Во-вторых, оценивается непосредственно значение шага дискретизации и далее сопоставляется с задаваемым временным параметром. По результатам проведенной обработки определяется соотношение, связывающее исходный и искомый шаги дискретизации (например, определяется соответствующий связывающий их коэффициент). Далее каждый элемент исходных данных приводится к заданному шагу дискретизации с учетом его значения и соответствующей единицы измерения.

На последующем шаге создается пустой массив  $Z$  для хранения данных интегрированного пространственного слоя. В цикле по исходным пространственным данным выполняется анализ используемого ими геопространственного примитива (или нескольких примитивов, что допустимо в исходных данных, представленных, к примеру, группой пространственных слоев). На каждой итерации цикла из массива пространственных данных выделяется используемый тип и выполняется проверка его соответствия искомому, заданному во входных параметрах типу геопространственного примитива  $type$ . Для этого вводится дополнительно переменная  $type_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ), каждое значение которой определяется типом примитива, используемого соответствующим  $i$ -м элементом пространственных данных. В случае обнаружения несоответствия выполняется соответствующая трансформация в соответствии с выражениями, приведенными в предыдущем параграфе. Результат трансформации (или исходный массив, если преобразование не требуется) загружается в массив пространственных данных  $Z$ .

На завершающем этапе сформированный сводный массив пространственных данных анализируется на наличие временной и атрибутивной разметки каждого выделенного (или полученного в результате трансформации) геопространственного примитива заданного типа. При необходимости выполняются соответствующие дублирования временной и атрибутивной информации. Важно отметить, что избыточность в данном случае является вынужденной необходимостью и обусловлена достижением цели сохранения целостности и информативности исходных геопространственных данных. Результирующий набор данных приводится к необходимому формату (в данном случае рассматривается GeoJSON) для передачи на клиентскую сторону и последующего рендеринга в виде геопространственного слоя на базовой картографической подложке.

### 5. Инфраструктура и архитектура решения

Представляется целесообразной веб-ориентированная реализация предложенных решений для обеспечения доступа к ним широкому кругу пользовате-

лей и приложений. Поскольку имеют место вычислительно затратные процедуры, связанные с получением и обработкой геопространственных данных (в том числе и большого объема) из нескольких разнородных источников, наиболее эффективным представляется их программная реализация на серверной стороне в распределенной архитектуре соответствующего веб-приложения.

В результате имеют место программные сервисы, инкапсулирующие предложенную функциональность по обработке геопространственных данных и рассматриваемые в качестве «черных ящиков», принимающих на входе один или более наборов данных и возвращающих, к примеру, интегрированный пространственный слой в заданном формате (здесь и далее в качестве базового формата представления результирующего слоя предлагается рассматривать GeoJSON как стандарт де-факто для геопространственной информации).

Окружением (и соответственно инфраструктурой) предложенного решения на программном уровне является непосредственно веб-сервер (с настройками SSL для повышения безопасности приложения), а также комплекс программных библиотек, подключаемых к проекту и реализующих необходимую функциональность по сбору, обработке и анализу геопространственной информации.

Для работы с геопространственной информацией был выбран язык программирования Python [21–23]. При этом для реализации серверных программных сценариев на языке программирования Python была применена архитектура MVC (Model – View – Controller), которая разделяет приложение на три основных компонента: модель, представление и контроллер [24].

Далее на основе архитектуры MVC предполагается разработка REST API (REpresentational State Transfer, передача состояния представления), ключевым преимуществом которого является отсутствие ограничений на используемый на всех уровнях работы тип данных [25].

С технической точки зрения отличительной особенностью предлагаемого решения является применение комбинированной архитектуры веб-приложения, сочетающей в себе, с одной стороны, параметры MVC-паттерна проектирования, и элементы веб-API, с другой (рис. 2).

При комбинировании рассматриваемых архитектур неизменными остаются два ее базовых компонента – контроллер и модель. На программном уровне при этом контроллер занимается получением и обработкой запросов на получение данных, которые поступают с клиентской стороны веб-приложения. В интегрированной архитектуре выделены два контроллера – соответственно MVC-контроллер и API-контроллер. Их объединяет общая модель, которая является объектно-ориентированным отображением

соответствующих данных и применяется, в частности, в качестве модели ORM при взаимодействии с реляционными базами данных. При этом архитектурно указанное решение выражается в последовательности передачи управления между контроллерами.

Непосредственно с данными (и соответственно) с моделью данных взаимодействует API-контроллер. Он принимает на вход параметры запроса, взаимодействует с моделью и формирует соответствующий (успешный или неудачный) результат. Взаимодействие с клиентом на уровне соответствующих запросов является зоной ответственности MVC-контроллера, который, с одной стороны, принимает и анализирует запросы с клиентской стороны, и принимает результирующие данные от API-контроллера для подстановки в представление и / или возвращения на клиентскую сторону. Таким образом, в общем виде архитектурная последовательность компонент приложения может быть представлена так: клиент – представление – MVC-контроллер – API-контроллер – модель.

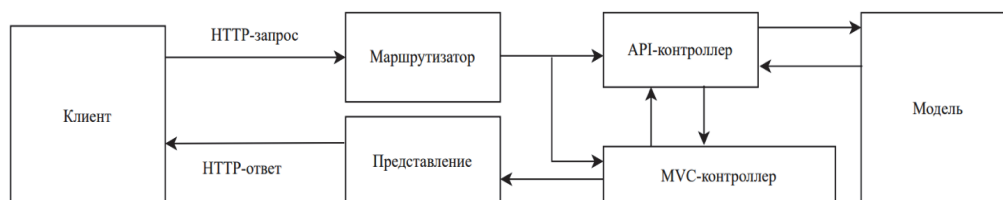


Рис. 2. Архитектура предлагаемого решения

При использовании описанной комбинированной архитектуры веб-приложения необходимо соответствующим образом настроить систему маршрутизации, что в дальнейшем поможет избежать возможных коллизий при обработке гетерогенных клиентских запросов. Система маршрутизации веб-приложения должны быть определена в отдельном системном файле, размещенном в той же виртуальной серверной директории, что и остальные компоненты приложения. При этом соответствующие настройки являются по сути надстройкой над каждым из выделенных контроллеров. Основной задачей маршрутизации в таком случае является распределение потоков запросов к тем контроллерам, которые должны их обрабатывать.

Кроме того, представляется целесообразным взаимное обращение к классам и методам контроллеров API и MVC. С этой целью в заголовки соответствующих конфигурационных файлов в серверной виртуальной директории должны быть указаны необходимые ссылки, осуществляющие подключение контроллеров друг к другу по типу сторонних программных библиотек. Это позволит избежать избыточности программного кода, а также упростит работу при тестировании и рефакторинге проекта.

При этом необходимо заметить, что физическая модель в предложенной архитектуре также может отсутствовать. При решении ряда прикладных задач возникают ситуации, когда в проекте отсутствует необходимость в единой централизованной базе данных (любой модели данных). Используемое в рамках рассматриваемой архитектуры представление может иметь в том числе элементы микросервисного паттерна проектирования. Такой подход предполагает независимость отдельных составляющих представления программных модулей (поскольку речь идет о веб-разработке, то имеются в виду именно клиентские сценарии), а также расширяемость решения за счет использования сторонних программных модулей и библиотек.

## 6. Апробация решения

Для апробации предложенного решения был разработан исследовательский прототип веб-приложения, обеспечивающего динамическую визуализацию интегрированного пространственного слоя на виртуальном глобусе. В качестве источников были синтезированы веб-сервисы, предоставляющие пространственные данные в формате GeoJSON, заданные совокупностью точек и полилиний в регулярной пространственной сетке с пространственным шагом в  $1^\circ$  и временным интервалом 1 мин. и 10 с соответственно. Интегрированный слой должен быть задан с шагом в 5 мин. и представлен совокупностью пространственных полилиний.

Для анализа эффективности предложенного решения были использованы данные, характеризующие изменение вероятности наблюдения полярных сияний в северном полушарии планеты. Источниками данных послужила информация, доступная через разработанный авторами API в рамках проекта «Auroga Forecast» [21] (полилинии), а также открытые данные с камер всего неба, также точно регистрирующие характеристики полярных сияний (точки). Были проанализированы вариации вероятностных характеристик полярных сияний из указанных источников на протяжении заданного временного интервала, в качестве которого был выбран 01.09.2022 08:25-09:20.

При этом специфика интегрируемых данных обусловлена как их различным форматом, так и используемым шагом дискретизации. Посредством предложенного решения данные были приведены к единому шагу и упорядочены для динамической визуализации и последующего анализа с применением элемента управления TimeSlider. Было установлено, что интенсивность и вероятностные характеристики полярных сияний с течением времени изменяются по направлению с запада на восток, усиливаясь по мере прибли-

жения визуализируемых данных к терминатору. Для повышения наглядности предложенного решения были добавлены функции вращения земного шара, а также изменение положения терминатора с учетом значений времени в UT.

Аналогичные исследования, проведенные для других интервалов времени, позволили оценить динамику изменения характеристик полярных сияний при различных параметрах геомагнитной активности. В частности, предложенное решение позволило оценить характер изменения области аврорального овала с течением времени по мере перехода от магнитно-спокойной обстановки к магнитным бурям и обратно. Было уставлено расширение области аврорального овала в период магнитной активности и сужение в магнитно-спокойные периоды. Полученные результаты выгодно отличают предложенное решение, поскольку позволяют анализировать описанную динамику, в том числе и в ретроспективном режиме для данных различного формата из гетерогенных источников. Существующие решения при этом статичны и ориентированы на работу только с одним источником данных.

Аналогичные исследования были проведены для данных по геомагнитному полю, которые были получены, с одной стороны, из разработанного авторами сервиса «Geomagnet» ([www.geomagnet.ru](http://www.geomagnet.ru)), а также по данным проекта «SuperMAG» (<https://supermag.jhuapl.edu/>). Результаты исследований позволили оценить динамику вариаций геомагнитного поля, а также параметров вектора невозмущенного геомагнитного поля в их соотношении и в ретроспективном режиме для различных периодов геомагнитной активности (для различных значений К<sub>p</sub>-индекса). Было установлено увеличение значений обозначенных геомагнитных вариаций в случае неспокойной геомагнитной обстановки и их плавное изменение при стабилизации геомагнитной обстановки.

В качестве инфраструктуры исследовательского прототипа была реализована комбинация веб-API и MVC-паттернов, построенная на базе серверного фреймворка Django. Серверные сценарии реализованы на языке программирования Python, клиентская составляющая основана на языке программирования JavaScript с использованием фреймворка Bootstrap. Кроме того, на клиентской стороне обработка, анализ и визуализация пространственной информации реализована на базе прикладного программного интерфейса ArcGIS API for JavaScript.

На уровне серверных сценариев в рамках веб-API реализован REST-сервис, на вход которого поступает совокупность пространственных данных в формате GeoJSON, а также параметры преобразования – временной шаг дискретизации и тип требуемого для визуализации геопространственного примитива (в рассматриваемом случае это 5 мин. и геопространственная полилиния соответственно). Далее также на серверной стороне выполняется их обработка, включающая приведение к единому шагу дискретизации по

времени, а также последовательную трансформацию исходного геопространственного примитива к требуемому (в рассматриваемом примере имеет место трансформация вида «геопространственные точки – геопространственные полилинии»). Результатом выполнения серверного сценария является формирование выходного потока GeoJSON-данных, направляемого либо непосредственно на клиентскую сторону в виде исходных данных, либо прошедших преобразование с учетом заданного представления.

Для переключения между временными метками для интегрированного пространственного слоя в интерфейс приложения через соответствующий шаблон (Template) был добавлен элемент управления класса TimeSlider. Это пользовательский инструмент, который позволяет анимировать изменение интегрированного пространственного слоя во времени с заданным шагом, а также делать мгновенные снимки (snapshot) для заданного момента времени из доступного временного интервала.

Кроме того, в рамках исследовательского прототипа веб-приложения были проанализированы возможности предложенного решения применительно к статичному во времени набору пространственных данных. В качестве такого слоя был рассмотрен набор пространственных данных, представленный единственной замкнутой полилинией и не содержащий временной отметки. Исследования показали, что для внедрения указанных данных в состав интегрированного пространственного слоя в соответствующим набор пространственных данных должна быть добавлена искусственно синтезированная временная метка в соответствии с заданными временными параметрами.

На клиентской стороне веб-приложения пространственная визуализация была реализована на уровне трехмерного виртуального глобуса в виде слоя в пространственными полилиниями. При этом представляется целесообразным отметить, что ни клиентская реализация, ни вариант представления базовой картографической подложки и примитива не являются в данном случае определяющими эффективность решения.

Основным результатом является формирование на серверной стороне интегрированного пространственного слоя, передаваемого в формате GeoJSON на клиентскую сторону, где непосредственно визуализация может быть выполнена любым известным способом ввиду применения стандартизованного представления пространственных данных.

## 7. Оценка качества решения

Оценка качества предложенных решений была выполнена на уровне ее программной реализации. В рамках разработанного исследовательского прототипа веб-приложения был представлен вариант трехмерной визуализации интегрированного слоя, построенного из трех разноформатных наборов пространственных данных с учетом заданных временных

меток. Исследования показали, что при работе с группой пространственных слоев (в базовом библиотечном варианте, предлагаемом подавляющим большинством API) невозможно синхронное управление временным изменением всех анализируемых пространственных данных, в том числе посредством интерфейсного элемента типа TimeSlider. При этом объединение данных в интегрированный пространственный слой позволяет решать поставленную задачу анализа временной анизотропии данных, оперируя ими как единым целым. Это, с одной стороны, позволяет сохранить неизменной всю необходимую для анализа информацию, и обеспечивает, с другой стороны, переносимость решения и его результатов на любые геоинформационные платформы (не только веб-ориентированные).

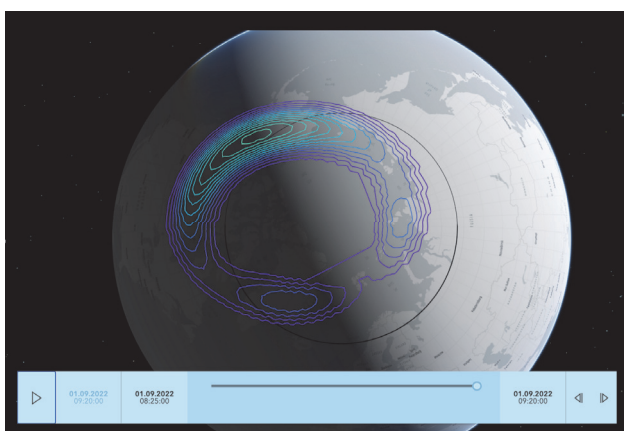


Рис. 3. Экранная форма приложения

Кроме того, была исследована эффективность предложенной смешанной веб-API и MVC-архитектуры. Экспериментальные исследования проводились на клиентской стороне с применением ЭВМ (CPU Intel Core i5 10300H ГГц, оперативная память 4 ГБ, скорость интернет-соединения ~52,4 Мбит/с) и на серверной стороне – на базе веб-сервера с процессором 72 \* Intel(R) Xeon(R) Gold 6140 CPU @ 2.30 GHz. В качестве оцениваемого параметра рассматривалась скорость рендеринга пространственного изображения на основании сгенерированных на серверной стороне приложения данных. Была проведена сравнительная оценка двух «чистых» архитектур (веб-API и MVC соответственно) и непосредственно предложенной смешанной архитектуры.

Исследования производительности выполнялись для одной и той же задачи: формирования и визуализации для анализа интегрированного пространственного слоя, построенного на основе данных трех гетерогенных источников с заданным временным интервалом и на базе единого геопространственного графического примитива (полилинии). В ходе нагрузочного тестирования с использованием инструментов онлайн-сервиса LoadFocus (<https://loadfocus.com/>) было установлено, что среднее время отклика (average time  $\pm$  standard deviation time) в исходном варианте

составляет  $37 \pm 0,86$  с, а в модифицированном –  $23 \pm 0,19$  с. Иными словами, вычислительная скорость выполнения процедуры формирования набора пространственных данных при внедрении предложенного решения увеличивается (порядка 14–15 с).

Кроме того, проведенное посредством указанного сервиса тестирование производительности приложения показало существенно уменьшение параметра FCP (англ. First Contentful Paint, первое существенное отображение) с 3,2 с до 1,24 с, а также улучшение значения индекса скорости страницы (Speed Index) с 5,8 до 2,34 с.

Для повышения информативности результатов нагрузочного тестирования и тестирования производительности аналогичные эксперименты были проведены с использованием персонального компьютера с GPU (использовалась AMD Radeon Pro 5500M with 8 GB GDDR6 VRAM). Анализ результатов показал, что по времени серверного отклика в целом изменения отсутствуют. При этом несколько лучшие значения демонстрируют показатели производительности на клиентской стороне: значение параметра FCP составило 2,8 с для исходного варианта и 1,12 с для модифицированного. Аналогичным образом значение Speed Index также улучшилось и составило 5,1 с для исходного варианта и 0,9 с для модифицированного.

### Заключение

Современные геоинформационные системы характеризуются сложностью и разнообразием как непосредственно обрабатываемых пространственных данных, так и инструментов и средств их интерпретации, анализа и визуализации. Практически в каждой предметной области присутствует и активно развивается целый спектр поставщиков пространственной информации, при этом гетерогенность соответствующих источников проявляется во многих аспектах данных: используются различные геопространственные примитивы, форматы представления данных, при наличии временного параметра – варьируются шаги дискретизации и пр. Подобная разнородность данных вызывает сложности, связанные с их синхронными обработкой и визуализацией на базовой картографической подложке.

В статье предложен подход, предполагающий формирование единого интегрированного пространственного слоя на основе группы разнородных пространственных слоев. Предложен метод взаимной трансформации геопространственных примитивов, позволяющий привести пространственные данные к заданному графическому объекту независимо от его исходных характеристик без потери атрибутивной и временной информации.

В общем виде новизна предложенного решения может быть сформулирована следующим образом. Предложен подход к интеграции разнородных векторных геопространственных данных, отличающийся тем, что гетерогенные геопространственные прими-

тивы на основе формализованных операций трансформации приводятся к единому типу без потери значений атрибутивных параметров с учетом их пространственно-временной привязки. Унификация затрагивает не только типы геопространственных примитивов, но и соответствующие метаданные и атрибутивные значения.

Кроме того, новизной метода является его универсальность применительно к векторным графическим данным, что позволит после программной реализации применять его дополнительно к известным геоинформационным библиотекам и инструментам.

Кроме того, сформулирован обобщенный алгоритм формирования интегрированного пространственного слоя из пространственных данных, полученных из распределенных гетерогенных источников. Его отличительной особенностью является возможность не только унификации базового графического пространственного компонента в данных, но и преобразование временных параметров к одному и тому же масштабу, заданному пользователем или приложением.

На примере искусственно синтезированных геопространственных данных разработан исследовательский прототип веб-ориентированного приложения для формирования и визуализации интегрированного геопространственного слоя с временной привязкой. Были реализованы два архитектурных подхода: традиционный распределенный на основе MVC-паттерна и предложенный в работе смешанный MVC и веб-API. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что вычислительная скорость выполнения процедуры формирования интегрированного пространственного слоя при внедрении предложенного решения увеличивается в среднем на 14 – 15 с.

### *Благодарности*

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект No 21-77-30010).

### *References*

- [1] Breunig M, et al. Geospatial data management research: progress and future directions. *ISPRS Int J Geoinf* 2020; 9: 95. DOI: 10.3390/ijgi9020095.
- [2] Ma X. Linked Geoscience Data in practice: where W3C standards meet domain knowledge, data visualization and OGC standards. *Earth Sci Inform* 2017; 10: 429-441. DOI: 10.1007/s12145-017-0304-8.
- [3] Zhu X, et al. Development and implementation of a dynamic and 4D GIS based on semantic location model. *Geo Spat Inf Sci* 2019; 22: 193-213. DOI: 10.1080/10095020.2019.1649192.
- [4] Sergiu D, Suletea A, Botez A, Jandic T. The use of spatial modeling to teach engineering graphics. *J Soc Sci* 2022; 5: 104-112. DOI: 10.52326/jss.utm.2022.5(2).09.
- [5] Chen F, Ma X, Ren H. Progressive transmission of vector spatial data. *J Netw* 2013; 8(5): 1065-1072. DOI: 10.4304/jnw.8.5.1065-1072.
- [6] Zhang H, Gao P, Li Zh. Improvements to information entropy for raster spatial data: A thermodynamic-based evaluation. *Abstracts of the ICA* 2019; 1: 426. DOI: 10.5194/ica-abs-1-426-2019.
- [7] Alqradaghi K, et al. Geospatial technique integrated with MC. *Water Air and Soil Pollution* 2022; 233: 313. DOI: 10.1007/s11270-022-05796-2.
- [8] Yu B, Zhang C, Sun J, Zhang Yu. Massive GIS spatio-temporal data storage method in cloud environment. *CSAI '18: Proc 2018 2nd Int Conf on Computer Science and Artificial Intelligence* 2018: 105-109. DOI: 10.1145/3297156.3297193.
- [9] Al-Mahfoodh N, Marzuki I, Samsuri A. Spatio-temporal modelling of noise pollution. *Int J Integr Eng* 2021; 13: 125-131. DOI: 10.30880/ijie.2021.13.03.015.
- [10] Peuquet D, Duan N. An event-based spatio-temporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *Int J Geogr Inf Sci* 1995; 9(1): 7-24.
- [11] Beiler M, Filion E. amtrak rail trespasser analysis using a GIS space-time approach. *Public Work Manag Policy* 2021; 26: 1087724X2110032. DOI: 10.1177/1087724X211003249.
- [12] Rachmatullah R, Azizah N. A conceptual data model for flood based on cellular automata using moving object data model. *J Phys: Conf Ser* 2017; 801: 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/801/1/012037.
- [13] Moins I, Boggio D. SIRS Dignes 2.0: A cooperative software for levees management. *E3S Web of Conferences* 2016; 7: 04018. DOI: 10.1051/e3sconf/20160704018.
- [14] Battista A, Saquicela V, Vilches-Blázquez L, et al. Geographical linked data: A Spanish use case. *Proc 6th Int Conf on Semantic Systems (I-SEMANTICS '10)* 2010: 36. DOI: 10.1145/1839707.1839753.
- [15] Egiazarian V, et al. Deep vectorization of technical drawings. In Book: Vedaldi A, Bischof H, Brox T, Frahm J-M, eds. *Computer Vision – ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part XIII*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58601-0\_35.
- [16] Kotsakis C. Spatial coordinate transformations with noisy data. In Book: Pepe A, Zhao Q, eds. *Geospatial analyses of earth observation (EO) data*. Ch 7. InTech Open; 2019. DOI: 10.5772/intechopen.87846.
- [17] Sekulovic D, Basaric M, Garic I. Helmert transformation on the case of Gauss-Krüger and UTM. *Contemporary Theory and Practice in Construction* 2019; 14: 288-298. DOI: 10.7251/STP2014288S.
- [18] Diakite A, Zlatanova S. Automatic geo-referencing of BIM in GIS environments using building footprints. *Comput Environ Urban Syst* 2020; 80: 101453. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.101453.
- [19] Ding H, et al. RTVEMVS: Real-time modeling and visualization system for vehicle emissions on an urban road network. *J Clean Prod* 2021; 309: 127166. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127166.
- [20] Horbiński T, Lorek D. The use of Leaflet and GeoJSON files for creating the interactive web map of the preindustrial state of the natural environment. *J Spat Sci* 2020; 67(1): 61-77. DOI: 10.1080/14498596.2020.1713237.
- [21] Vorobev AV, et al. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology. *Russ J Earth Sci* 2020; 20: ES6001. DOI: 10.2205/2020ES000721.
- [22] Vorobev AV, et al. System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances based on data from ground-based magnetic stations. *Sci Vis* 2021; 13(1): 162-176. DOI: 10.26583/sv.13.1.11.
- [23] Vorobev AV, Pilipenko VA, Enikeev TA, Vorobeva GR. Geographic information system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances based on observation data from ground stations. *Computer Optics* 2020; 44(5): 782-790. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-707.

[24] Nguyen LAT, et al. Design and implementation of web application based on MVC Laravel architecture. European Journal of Electrical Engineering and Computer Science 2022; 6: 23-29. DOI: 10.24018/ejecs.2022.6.4.448.

[25] Marculescu B, Zhang M, Arcuri A. On the faults found in REST APIs by automated test generation. ACM Trans Softw Eng Methodol 2022; 31(3): 41. DOI: 10.1145/3491038.

---

**Сведения об авторах**

**Воробьев Андрей Владимирович**, 1983 года рождения, в 2006 году окончил магистратуру Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) по направлению «Электроника и микроэлектроника», доктор технических наук, доцент, работает профессором кафедры геоинформационных систем ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, старшим научным сотрудником ФГБУН Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН), а также профессором кафедры геофизики ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет. Область научных интересов: цифровая обработка геомагнитных данных, геоиндуцированные токи, интеллектуальные системы и технологии, геоинформационные системы. E-mail: [geomagnet@list.ru](mailto:geomagnet@list.ru)

**Воробьева Гульнара Равилевна**, 1983 года рождения, в 2005 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления», доктор технических наук, доцент, работает профессором кафедры вычислительной математики и кибернетики ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий. Область научных интересов: геоинформационные системы, веб-технологии, системы хранения и обработки информации. E-mail: [gulnara.vorobeva@gmail.com](mailto:gulnara.vorobeva@gmail.com)

---

ГРНТИ: 83.77.31

Поступила в редакцию 16 января 2023 г. Окончательный вариант – 4 августа 2023 г.

---



---

# An approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images

A.V. Vorobev<sup>1,2,3</sup>, G.R. Vorobeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Center of RAS, 119296, Moscow, Russia, Molodezhnaya St. 3;

<sup>2</sup> Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia, Z. Validi st. 32;

<sup>3</sup> Ufa State Petroleum Technological University, 450064, Ufa, Russia, Kosmonavtov st. 1

## Abstract

One of the well-known problems of geoinformation software libraries in the visualization of geospatial data is the low efficiency and limited frame-by-frame change of a group of spatial layers with time reference. Among the most significant challenges of visualization is that the synchronous switching of a group of spatial layers is impossible to perform, which leads to less accurate estimates of the temporal anisotropy of the corresponding spatial data. The problem is further exacerbated by the heterogeneity of spatial information, which is expressed in sampling steps, formats used by geospatial primitives. The said problem significantly complicates the analysis of spatiotemporal information in many research and application areas. An illustrative example may be found in the problem of analyzing the spatiotemporal anisotropy of geophysical information. Here, for the visualization to be implemented, the dynamic evaluation of the retrospective data in a given time interval needs to be performed. The paper proposes an approach that enables heterogeneous vector geospatial data to be integrated before subsequent processing, analysis and visualization. The effectiveness of the developed approach is confirmed by the example of a web application for visualizing a geospatial image as an array of spatial polylines of arbitrary data, as well as in the problem of analysis of spatiotemporal variations of geophysical data.

**Keywords:** spatial data, geoinformation technologies, geospatial image, geospatial primitives.

**Citation:** Vorobev AV, Vorobeva GR. An approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images. *Computer Optics* 2024; 48(1): 123-138. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1279.

**Acknowledgements:** The work was funded by the Russian Science Foundation under project No. 21-77-30010.

---

## Authors' information

**Andrei Vladimirovich Vorobev** (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2006, majoring in Electronic and Microelectronics, D.Sc. Currently he works as the professor at Geoinformation Systems department in Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, and as senior researcher in Geophysical Center of RAS, Moscow, Russia, and as the professor of Geophysics department in Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia. Research interests are digital geomagnetic data processing, geomagnetically induced currents, intelligent systems and technologies, geoinformation systems. E-mail: [geomagnet@list.ru](mailto:geomagnet@list.ru)

**Gulnara Ravilevna Vorobeva** (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2005, majoring in Automated Systems of Data Processing and Control, D.Sc. Currently she works as the professor at Computer Science and Robotics department in Ufa University of Science and Technology. Research interests are geoinformation and web technologies, systems of information storing and processing. E-mail: [gulnara.vorobeva@gmail.com](mailto:gulnara.vorobeva@gmail.com)

---

*Received January 16, 2023. The final version – August 04, 2023.*

---