

Модуль решения прямой задачи магниторазведки для анализа данных беспилотной магнитной съемки

© О. Б. Цыдыпова, С. В. Григорьев

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. В практике геологических исследований важную роль играет измерение и анализ геофизических полей. Одним из распространенных методов анализа является магниторазведка, используемая как для поиска месторождений, так и для изучения геологического строения территории. В основе магниторазведки лежит измерение модуля вектора магнитного поля и его составляющих. Геологическая интерпретация получаемых данных может быть выполнена за счет решения прямой задачи, которая позволяет анализировать магнитные аномалии Земли. В данной работе описывается программный модуль решения прямой задачи магниторазведки, созданный для системы обработки и анализа данных, полученных в ходе беспилотной магнитной съемки. Упомянутая система обработки и анализа разрабатывается в Институте «Сибирская школа геонаук». При изучении существующих аналогов информационных систем с функцией экспресс-решения прямой задачи магниторазведки не было найдено подходящих решений, в связи с чем появилась необходимость в разработке данного модуля. Использование модуля позволяет автоматизировать и ускорить процесс обработки геофизических данных. Полученные с помощью данного модуля решения расширяют возможности интерпретатора, выполняющего поиск месторождений полезных ископаемых, и тем самым повышают качество геологических исследований.

Ключевые слова: модуль информационной системы, анализ данных, геофизические данные, интерпретации данных магниторазведки, прямая задача магниторазведки

Module for solving the direct problem of magnetic exploration for the analysis of unmanned magnetic survey data

© Oyuna B. Tsydyпова, Stanislav V. Grigorev

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. In the practice of geological research, work related to the measurement and analysis of geophysical fields plays an important role. The study of such fields is carried out using geophysical methods of searching for deposits, one of which is magnetic exploration. Magnetic exploration is used both to search for deposits and to study the geological structure of the territory. It is based on the measurement of the modulus of the magnetic field vector and its components. The geological interpretation of the data obtained can be performed by solving a direct problem that allows analyzing the magnetic anomalies of the Earth. This paper describes a software module for solving a direct problem of magnetic exploration, created for a system for processing and analyzing data of unmanned magnetic survey, being developed at the Institute "Siberian School of Geosciences". When studying the existing analogues of information systems with the function of express solutions to the direct problem of magnetic exploration, no suitable solutions were found, and therefore there was a need to develop this module. Using the module allows you to automate and speed up the process of processing geophysical data. The solutions obtained with the help of this module expand the interpreter's capabilities when performing work for the detection of mineral deposits and thereby improves the quality of geological research.

Keywords: information system module, data analysis, geophysical data, interpretation of magnetic exploration data, direct problem of magnetic exploration

Геофизика изучает различные физические поля Земли и использует полученные данные в том числе для выявления полезных ископаемых и изучения геологической среды.

Исследование таких полей осуществляется методами, имеющими большое практическое значение в геологии [1]. Ранее других методов возникла магниторазведка, основанная на изучении магнитного поля Земли и

магнитных характеристик геологических тел [2]. Для исследований применяются магнитометры – специальные приборы, которые позволяют измерять составляющие вектора напряженности магнитного поля. В настоящее время преимущественно используются модульные магнитометры, измеряющие величину модуля полного вектора магнитного поля Земли. Эти приборы характеризуются

высокой точностью и не обладают погрешностями пространственной ориентировки.

На современном этапе развития геофизических методов магниторазведка отличается наибольшей экономической эффективностью благодаря использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), переносящих магнитометры [3]. Изучаемая площадь покрывается сетью пересекающихся профилей вдоль и поперёк предполагаемого объекта. В точках профилирования регистрируются параметры геофизических полей. На основе собранных данных выделяются магнитные аномалии для детального анализа геологического строения и выявления месторождений полезных ископаемых. Анализ геофизических аномалий основан на решении прямой и обратной задачи геофизики [4]. Целью данной работы является решение прямой задачи.

В работе рассматривается реализация программного модуля, позволяющего системе обработки данных магнитной съемки с БПЛА решить прямую задачу магниторазведки. Система разрабатывается Институтом «Сибирская школа геонаук», входящим в состав ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Анализ данных на основе решения прямой задачи позволяет реализовать целый ряд мер, включающих прикладные интерпретационные и методические решения для магниторазведки [5]. Эти задачи весьма актуальны при практических магниторазведочных работах на лицензионных участках недропользователей. Что особенно важно, модуль позволяет решать практические задачи непосредственно в процессе выполнения полевых геологоразведочных работ, предоставляя возможность экспресс-решения прямой задачи.

Для оценки целесообразности разработки модуля выполнен анализ существующих на рынке информационных систем с функцией решения прямой задачи магниторазведки. Были выявлены следующие проблемы:

1. На рынке представлены комплексные решения (Сигма 3D) стоимостью от полумиллиона рублей [6]. При покупке подобного продукта происходит большая переплата за

модуль, при этом нет уверенности в том, что остальные функции программы подойдут под решаемые задачи.

2. Специализированные институты (СНИИГГиМС и др.) предлагают заключение договоров на обработку данных, что не решает задачу экспресс-расчета [7].

3. Большое разнообразие программных средств представлено зарубежными компаниями, взаимосвязь с которыми затруднена. Модуль позволяет учитывать политику импортозамещения и не зависеть от иностранных производителей.

4. Найдено одно бесплатное решение (MagModel 2D) [8], которое не подходит по нескольким причинам:

– программа решает прямую задачу магниторазведки для двумерных тел, тогда как в реальных условиях необходим анализ трехмерных геологических тел. Кроме того, двумерное упрощение может вызвать ошибки интерпретации;

– программа разработана для учебных целей и применяется для решения простых задач, что может сказаться на корректности в сложных случаях.

5. Существующие на рынке системы не обеспечивают экспресс-обработки данных.

В связи с этим разработка модуля решения прямой задачи магниторазведки является актуальной и позволяет решить выявленные проблемы.

Реализация данного модуля настроена на обработку данных, получаемых по технологии, разработанной в Институте «Сибирская школа геонаук». В системе, для которой разрабатывается модуль, применяется принцип модульного программирования. Суть такого подхода заключается в разбиении программы на независимые друг от друга части, называемые модулями. Разделение чаще всего происходит по функциональным признакам: каждый модуль решает конкретную задачу, а основная программа, представляющая собой набор таких модулей, решает проблему в целом. Модуль состоит из классов, позволяющих работать с данными, производить расчет и отображать полученное решение на системе взаимосвязанных графических форм. Для создания системы и ее модулей на языке C# используется бесплат-

ная и полнофункциональная среда разработки – Visual Studio Community 2022.

Расчет прямой задачи простейшего тела (материальной точки) основан на теории гравитационного потенциала. Потенциал V материальной точки, имеющей координаты $P(x, y, z)$ в поле M , с единичной пробной массой m можно определить по формуле:

$$V(P) = \frac{Gm}{R}, \quad (1)$$

где $V(P)$ – потенциал силы притяжения точки M на точку P ,

G – гравитационная постоянная,

m – масса точки,

R – расстояние между телом и точкой профиля.

Согласно определению потенциала V , составляющие гравитационного поля равны

$$F_k = -\frac{Gm\Delta k}{R^3}, \quad (2)$$

где F_k – составляющая гравитационного поля для оси k ,

G – гравитационная постоянная,

m – масса точки,

Δk – проекции R на выбранную ось в системе координат x, y, z ,

R – расстояние между телом и точкой профиля.

Составляющие магнитного поля рассчитываются согласно теореме Пуассона, связывающей магнитный и гравитационный потенциал, и имеющей следующий вид

$$T_k = \frac{3\Delta k(M_x\Delta x + M_y\Delta y + M_z\Delta z) - M_k R^2}{R^5}, \quad (3)$$

где T_k – составляющая магнитного поля для оси k ,

R – расстояние между телом и точкой профиля,

Δk – проекция R на выбранную ось в системе координат x, y, z ,

Δx – проекция R на ось x ,

Δy – проекция R на ось y ,

Δz – проекция R на ось z ,

M_k – магнитный момент тела для оси k ,

M_x – магнитный момент тела для оси x ,

M_y – магнитный момент тела для оси y ,

M_z – магнитный момент тела для оси z .

Так, магнитная аномалия сферического тела в трехмерном пространстве будет описана выражением

$$\Delta T = \sqrt{(T_x + T_{x3})^2 + (T_y + T_{y3})^2 + (T_z + T_{z3})^2} - \sqrt{T_{x3}^2 + T_{y3}^2 + T_{z3}^2}, \quad (4)$$

где ΔT – аномалия модуля вектора магнитного поля,

T_x – рассчитанная x составляющая аномального магнитного поля,

T_y – рассчитанная y составляющая аномального магнитного поля,

T_z – рассчитанная z составляющая аномального магнитного поля,

T_{x3} – x составляющая магнитного поля Земли,

T_{y3} – y составляющая магнитного поля Земли,

T_{z3} – z составляющая магнитного поля Земли [9].

Формула (4) аномального магнитного поля выбрана в связи с применением в практике работ магнитометров, фиксирующих модуль магнитного поля Земли.

Для расчёта аномалии магнитного поля нужны такие данные, как координаты профилей и геологического тела с заданным магнитным моментом. Координаты профилей считываются из файла, загруженного в систему. Параметры тела задаются и удаляются непосредственно в графическом окне, вид которого представлен ниже (рис. 1). Изменение координат тела осуществляется с помощью передвижения его на графическом объекте, при этом перемещение тела в одной плоскости отображается на другой в режиме реального времени. Расположение тела по направлениям x, y, z передается в текстовые поля. Направление координатных осей следующее: x – географический север, y – географический восток, z – центр Земли. Магнитный момент для трех пространственных компонент M_x, M_y и M_z задается после задания тела через элементы управления.

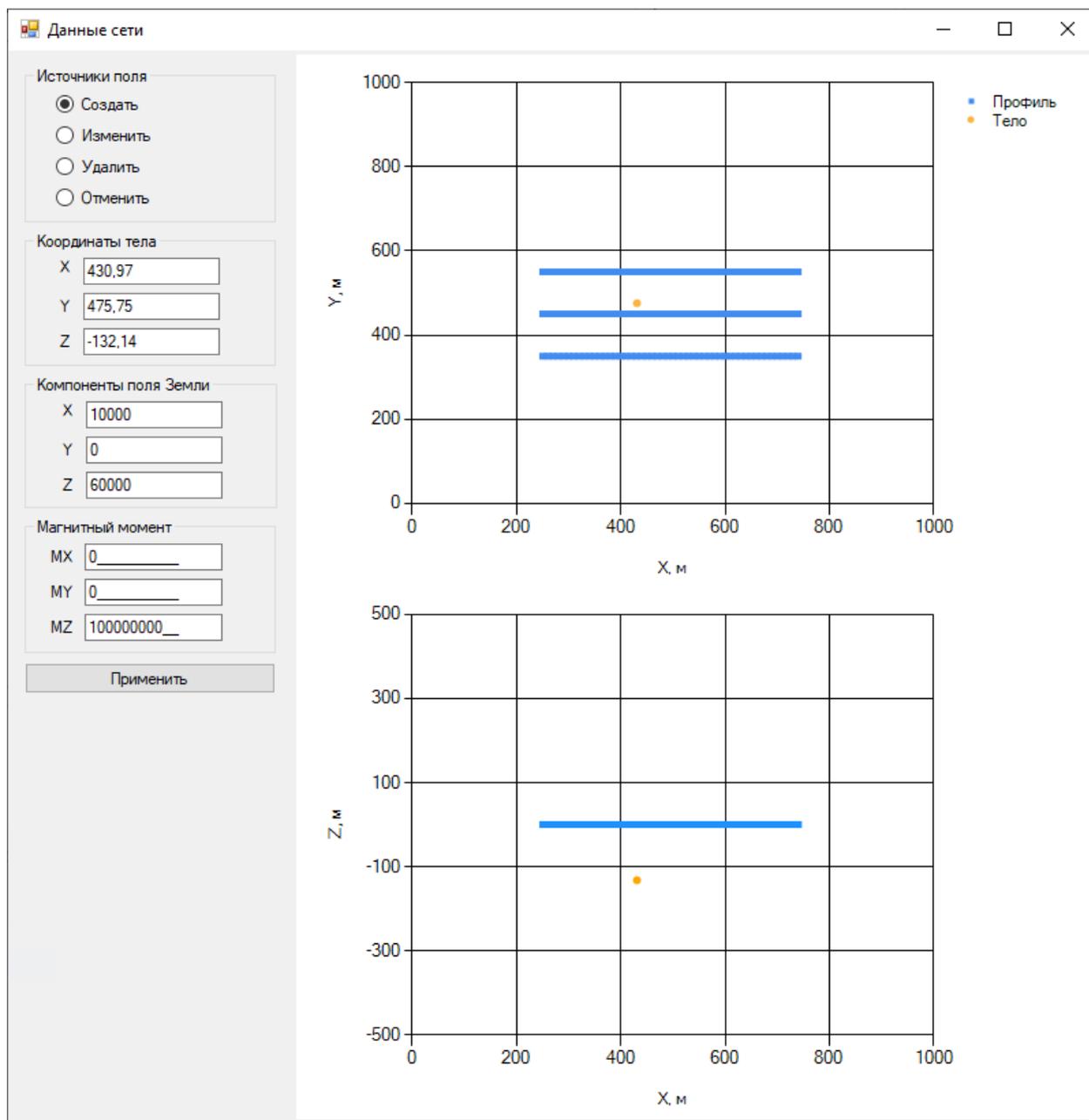


Рис. 1. Окно отображения сети профилей и работы с геологическим телом

После передачи всех необходимых данных выполняется расчет прямой задачи, результат которого отображается на графике (рис. 2). Чем ближе геологическое тело расположено к профилю, тем интенсивнее проявляется аномалия. На основе полученного решения возможно:

- проверить геологическую гипотезу;
- изучить закономерности связи полей и их источников;
- осуществить аналитическое исследование полей и их связи с источниками, создающими эти поля;

– проверить оптимальность планового и высотного расположения съемочных профилей [10].

В модуле реализован графический диалог с пользователем, позволяющий в интерактивном режиме менять параметры модели с помощью визуальных элементов управления и одновременно получать решение задачи.

Практическая значимость разработанного модуля для анализа геофизических данных может быть показана на примере. С помощью модуля мы попробуем определить глубину залегания геологического тела.

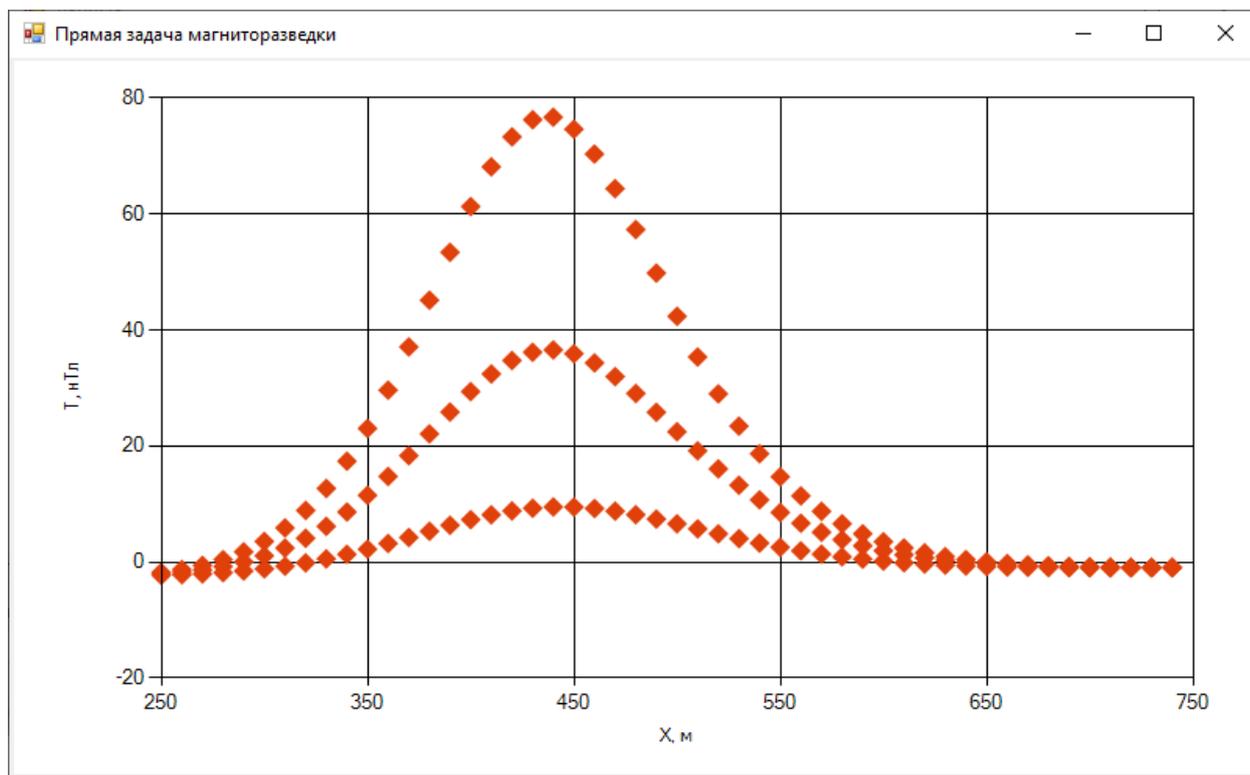


Рис. 2. Окно с результатом решения прямой задачи магниторазведки

На рис. 3 изображена исходная аномалия с максимальным значением $T = 1569,73$ нТл в точке $x = 392$ м. Данные зафиксированы на одном из участков работ на северо-востоке Иркутской области, где составляющие магнитного поля Земли: $T_{xz} = 10000$ нТл, $T_{yz} = 0$ нТл, $T_{zz} = 60000$ нТл. Используя модуль, нам удалось подобрать под аномалию модель: тело с глубиной $z = 155,66$ м и магнитным моментом $MZ = 3 \cdot 10^9$ А*м². Глубина определяется методом подбора

рассчитанной аномалии к аномалии, зафиксированной при БПЛА съемке. Сравним подобранную модель с имеющейся моделью магнитной аномалии в одном масштабе. На графике видно, как схожи аномалии: совпадение их «крыльев» говорит, что глубина тела подобрана правильно. Можно прийти к выводу, что исходную аномалию даёт геологическое тело с магнитным моментом $3 \cdot 10^9$ А*м² на глубине 155,66 м.

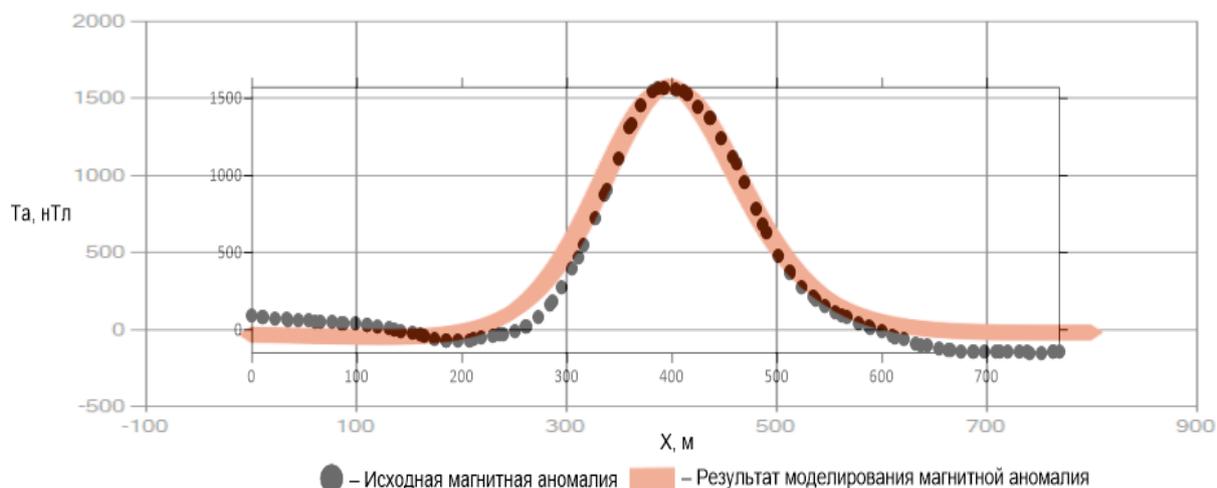


Рис. 3. Сравнение результата моделирования с исходной магнитной аномалией

Итак, результатом работы является программный модуль для решения прямой задачи магниторазведки, созданный для системы обработки данных магнитной съемки. Модуль будет применяться для работы над проектами геологоразведочных исследований и поиска месторождений полезных ископаемых. Внедрение модуля оптимизирует процессы расчета, позволит сократить время обработ-

ки геофизических данных и повысить качество геологических исследований. Модуль применим при полевых геологоразведочных работах и позволяет спроектировать оптимальную плотность сети профилей таким образом, чтобы при минимальных временных затратах произвести качественную магнитную съемку.

Список источников

1. Костицын В. И., Хмелевской В. К. Геофизика. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2018. 428 с.
2. Богословский В. А. Геофизика. М.: «КДУ», «Добросвет», 2018.
3. Чадаев М. С., Костицын В. И., Ибламинев Р. Г. Возможности геофизических методов при изучении неоднородностей земной коры. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2017. 136 с.
4. Новиков П. В. Решение прямых и обратных задач электромагнитных зондирований на персональном компьютере. М.: МГРИ, 2019. 44 с.
5. Лыгин И. В., Соколова Т. Б., Булычев А. А. Интерпретация геофизических материалов. Саратов: Изд-во «Вузовское образование», 2020. 223 с.
6. Бабаянц П. С., Блох Ю. И., Трусев А. А. Пакет программ СИГМА 3D разработан для геофизической интерпретации аномалий гравитационного и магнитного поля // ООО "ПрофСофт". [Электронный ресурс]. URL: [https://www.audit-it.ru/allsoft/bazovye-produkty/sigma-3d/\(2.05.2022\)](https://www.audit-it.ru/allsoft/bazovye-produkty/sigma-3d/(2.05.2022)).
7. Эпов М. И. Обработка и интерпретация геофизических данных // АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <https://sniiggims.ru/services/obrabotka-i-interpretatsiya-geofizicheskikh-dannykh/obrabotka-seismicheskikh-dannykh/> (3.05.2022).
8. Новиков К. В. MagModel 2D // Портал «m&e» [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://magnetometry.ru/soft/magmodel.html> (15.02.2022).
9. Блох Ю. И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: Изд-во РГГРУ, 2009. 232 с.
10. Булычев А. А., Лыгин И. В., Мелихов В. Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки. М.: Изд-во МГУ, 2010. 164 с.

Информация об авторах / Information about the Authors

Оюна Батоевна Цыдыпова,
магистрант группы АУДМ-20-1,
Институт информационных технологий и анализа данных,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
batoevnaa@mail.ru

Станислав Валентинович Григорьев,
доцент,
Институт информационных технологий и анализа данных,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
svg@istu.edu

Oyuna B. Tsydyпова,
Master student,
Institute of Information Technology and Data Analysis,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
batoevnaa@mail.ru

Stanislav V. Grigorev,
Associate Professor,
Institute of Information Technology and Data Analysis,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
svg@istu.edu