

УДК 550.838  
DOI: 10.47148/1609-364X-2021-1-45-50

© К.М. Ермохин

*К.М. Ермохин*

## Возможности тренд-анализа при предобработке геофизических полей на модельном примере

**Аннотация.** На модельном примере показаны негативные следствия тренд-анализа на общее решение задачи интерпретации данных геофизики. В качестве альтернативы предложено аналитическое продолжение вниз данных измерений с поверхности земли.

**Ключевые слова:** предобработка, моделирование, вычислительная процедура, полиномиальный тренд, метод главных компонент, пересчет поля вверх, аналитическое продолжение.

*К.М. Ermokhin*

*Possibilities of trend analysis in the preprocessing of geophysical fields on a model example*

**Abstract.** A model example shows the negative consequences of the trend analysis for the solution of the problem of interpretation of geophysical data. As an alternative, an analytical downward continuation of the measurement data from the earth's surface is proposed.

**Keywords:** preprocessing, modeling, computational procedure, polynomial trend, principal component analysis, upward recalculation of the field, analytical continuation.

Поступила 07.11.2020  
Доработана 08.02.2021

Принята к печати 01.03.2021

### Введение

Общепринятым подходом при интерпретации данных является разделение наблюдаемого поля на региональную и локальную составляющие в качестве первого этапа геоинформационной обработки данных измерений, т.е. снятие тренда (тренд-анализ) [1]. Этот этап предобработки геофизической информации является исторически первым. Для его осуществления предложен ряд вычислительных процедур, на основных из которых остановимся ниже. Завершающей стадией интерпретации является решение обратной задачи тем или иным методом.

Сам термин *тренд* не имеет четкого математического определения и означает лишь тенденцию (рост, падение, постоянство). Это понятие возникло и применяется в экономике именно как линейная часть наблюдаемых данных. Для геофизики этого, очевидно, недостаточно.

При анализе данных геофизических измерений делается множество трансформаций с применением тренда, направленных на выделение локальной составляющей поля: осреднение по кругам,

пересчет вверх, различные виды пространственных фильтров [1].

В докомпьютерное время наиболее активно применялась вычислительная процедура осреднения, как наиболее простая в реализации, с помощью палеток, но ее возможности сильно ограничены ввиду неустойчивости при пересчете на малые высоты и существенного сокращения области исследования при пересчете на большие высоты.

Остановимся на трех методах, распространенных в настоящее время. Для развития геоинформационных технологий вопрос о применении трансформаций геофизических полей является отнюдь не второстепенным, а иногда даже определяющим [4].

При профильных измерениях в геофизике обычно применяется полиномиальный (невысокой степени) тренд [1].

Для площадных съемок часто используют метод главных компонент (например, в широко распространенной системе GEOSOFT). Эффективность этого подхода показана в [7] на реальном месторождении, однако без проверки метода на модельных примерах, что весьма желательно.

Эффективным также считается пересчет поля вверх (также реализованный в системе GEOSOFT).

Так или иначе, процесс снятия тренда или разделения полей опирается, по сути, на пространственную частотную или энергетическую фильтрацию наблюдаемого поля [3].

Степень доказательности этих подходов при множественности аномалий на профиле или площади поиска невысока и опирается на интуитивный подход.

Кроме того, следует учитывать, что глубина определения аномалиеобразующих объектов ограничена половиной длины профиля измерений, поскольку пространственные волны большей длины оказываются представленными в данных только частично, т.к. их период больше длины профиля и определить их амплитуду невозможно. Поэтому влияние более глубоких структур и объектов принципиально неопределимо без субъективных априорных предположений, что ограничивает возможность применения трансформаций, в частности аналитического продолжения поля как вверх, так и вниз.

Обозначить проблемы, возникающие при снятии тренда, и предложить некоторую альтернативу – основная задача данного исследования на модельном примере. При использовании программ интерпретации геофизических данных необходимо убедиться с помощью математического и физического моделирования, что алгоритм решения обратной задачи работает корректно. Такая проверка дает интерпретатору уверенность в том, что и на практике есть основания получить достоверный результат.

**Модельный пример**

Рассмотрим простую модель среды: три шара радиусом 100, 150 и 200 м с избыточной плотностью  $\sigma = 1 \text{ г/см}^3$  на глубинах, соответственно: 200, 300 и 400 м. В качестве региональной помехи поместим шар радиуса 400 м ( $\sigma = 1 \text{ г/см}^3$ ) на глубине 1500 м (вне области поиска). Центры всех шаров расположим в плоскости  $y = 0$  (рис. 1).

Решив модельную прямую задачу по площади  $2000 \times 2000 \text{ м}$  (рис. 2), выделим центральный профиль (над центрами шаров). Уровень поля при наличии крупного шара-помехи ( $r = 400 \text{ м}$ ) и его отсутствии различается приблизительно в 1,5 раза (рис. 1).

Сначала в качестве тренда на этом профиле выберем полином третьей степени, т.к. первой и второй явно недостаточно, а более высокая степень заведомо уничтожает локальные аномалии. Затем решим обратную задачу (ОЗ) методом наименьших квадратов без глубинного объекта (ГО), при его наличии и с вычетом тренда (1). Следующим шагом

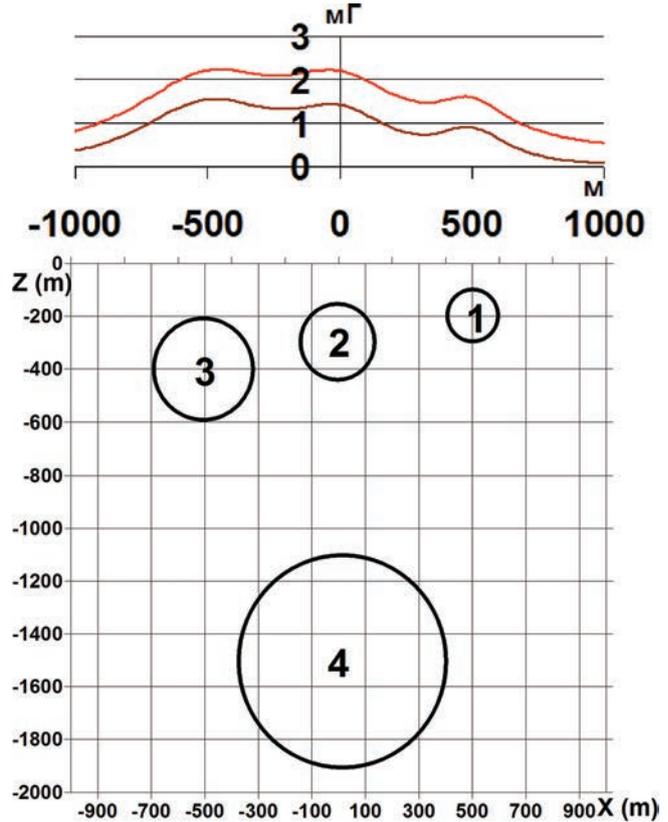


Рис. 1. Положение аномалиеобразующих объектов в разрезе (плоскости XZ,  $y = 0$ ) и гравитационное поле модели из трех шаров (коричневая линия) и поле этой же модели с дополнительным глубинным шаром (красная линия)

Fig. 1. Position of anomalous objects in the section (XZ plane,  $y = 0$ ) and the gravitational field of the three-ball model (brown line) and the field of the same model with an additional deep ball (red line)

определим тренд методом главных компонент и, наконец, пересчетом поля вверх.

Решать ОЗ будем в предельно простой постановке: определять только массы шаров  $M_i$ , зафиксировав их истинное положение в пространстве. Для этого используем систему уравнений

$$\gamma \sum_{i=1}^3 \frac{M_i z_i}{r_{ij}^{3/2}} = \Delta g_j,$$

где  $\gamma$  – гравитационная постоянная;  $M_i$  – массы шаров ( $i = 1, 2, 3$ );  $z_i$  – глубина их центров;  $r_{ij}$  – расстояние от центра  $i$ -го шара до  $j$ -й точки профиля измерений;  $\Delta g_j$  – значения измеренного поля по профилю;  $j = 1 \dots N$ . Шаг измерений по профилю 20 м. Число измерений  $N \gg 3$ , что избыточно для определения трех масс.

Результаты представлены в таблице 1.

1. При отсутствии глубинного объекта массы определяются точно (рис. 1, коричневая линия).

2. При наличии ГО без снятия тренда массы оказываются завышенными в 1,5-2 раза (рис. 1,

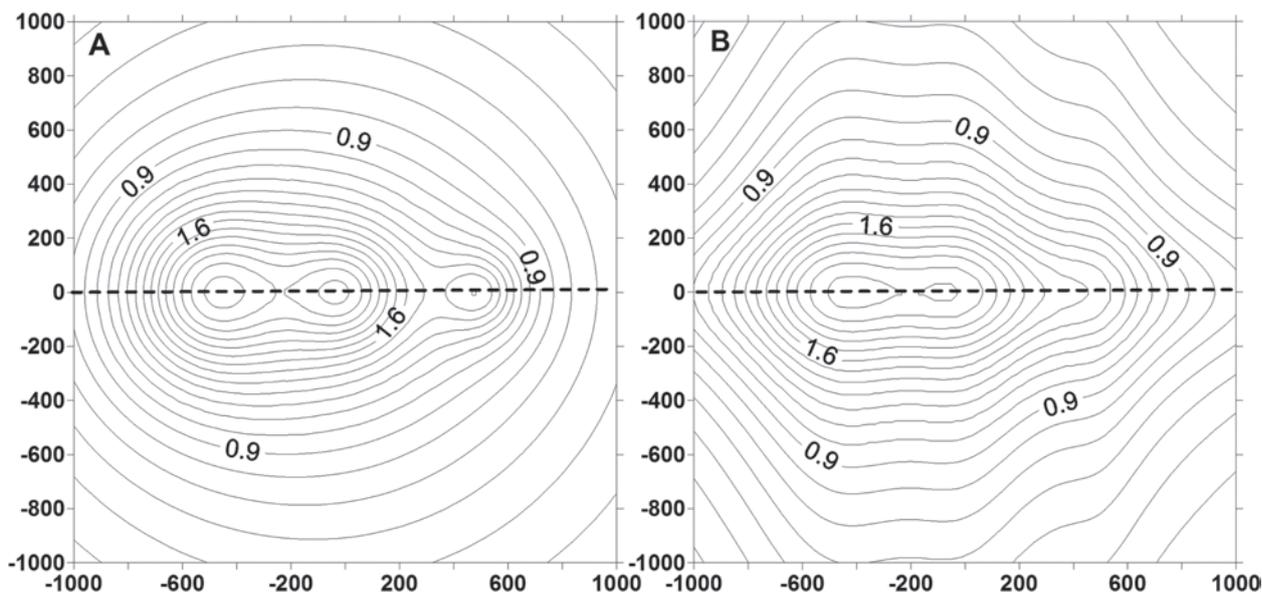


Рис. 2. Гравитационное поле трех шаров и ГО (в плане) (А) и его первая главная компонента – тренд (В). Центральный профиль  $y = 0$  (---)

Fig. 2. Gravitational field of three balls and DB (in plan) (A) and its first major component is trend (B). Central profile  $y = 0$  (---)

красная линия). Это дает либо избыточную плотность в 1,5-2 раза большую (что нереально), либо размер диаметра на 15-20% больше истинного (для геологии это приемлемо!).

3. При снятии полиномиального тренда (рис. 3, зеленая линия) появляются отрицательные значения избыточных масс (которых реально нет).

4. Используя в качестве тренда главную по площади компоненту (первую, что обычно и делается [7]) на профиле  $y = 0$  на основе факторного анализа и вычитая вычисленный тренд (рис. 4, зеленая линия), снова получаем ложные результаты (в том числе – отрицательные значения избыточных масс).

5. Используя в качестве тренда продолжение поля вверх на максимально возможную высоту 1000 м (половина длины профиля) на профиле

$y = 0$  (напомним, что ГО находится на глубине 1500 м) и вычитая этот тренд (рис. 5, зеленая линия), снова получаем ложные результаты.

Заметим, что глубинный объект симметрично расположен по центру профиля  $y = 0$ , однако ни один из вышеописанных методов определения тренда не дал симметричной кривой (рис. 3, 4, 5).

При этом, учитывая формулу коэффициента затухания поля от объекта с высотой  $N(z, h) = \frac{z^2}{(z+h)^2}$ , где  $z$  – глубина объекта,  $h$  – высота пересчета [1], видим, что поле от шара 1 на высоте 1000 м уменьшилось в 36 раз, от шара 3 – в 12 раз (что означает действительно существенное подавление поля от приповерхностных неоднородностей). Однако поле от ГО тоже уменьшилось, хотя и менее чем в 3 раза.

Таблица 1

**Результаты решения обратной задачи при фиксированном положении центров аномалеобразующих объектов**

Table 1. Results of solving the inverse problem for a fixed position of the centers of anomalous-forming objects.

№	$M_1(\tau)$	$M_2(\tau)$	$M_3(\tau)$
1	4,2 <sub>10 6</sub>	1,4 <sub>10 7</sub>	3,3 <sub>10 7</sub>
2	8,9 <sub>10 6</sub>	2,3 <sub>10 7</sub>	5,0 <sub>10 7</sub>
3	-8,8 <sub>10 5</sub>	8,8 <sub>10 5</sub>	-5,0 <sub>10 6</sub>
4	-6,7 <sub>10 2</sub>	5,7 <sub>10 5</sub>	7,2 <sub>10 2</sub>
5	6,8 <sub>10 4</sub>	9,0 <sub>10 4</sub>	2,7 <sub>10 5</sub>

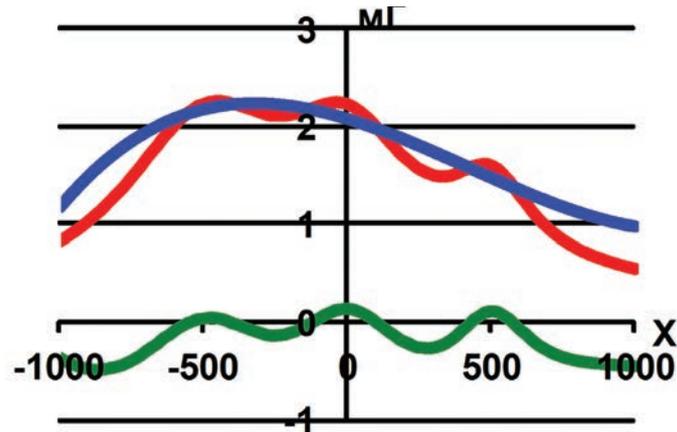


Рис. 3. Гравитационное поле над моделью из трех шаров с дополнительным глубинным шаром – красная линия, полиномиальный тренд третьей степени – синяя линия, результат вычитания тренда (локальная составляющая) – зеленая линия

Fig. 3. The gravitational field of the model of three balls with additional depth ball (DB) – red line, third-degree polynomial trend – blue line, the result of subtraction of the trend (local component) – green line

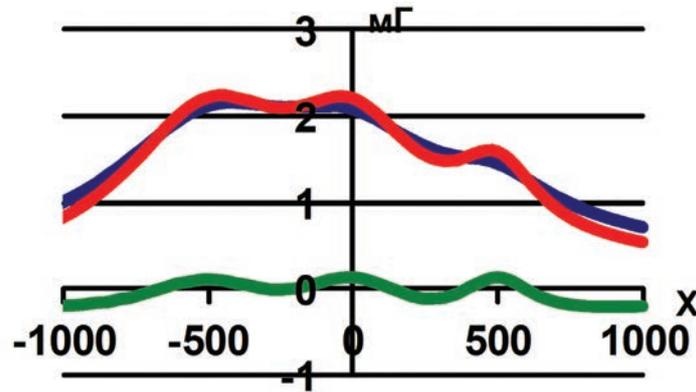


Рис. 4. Гравитационное поле над моделью из трех шаров с ГО – красная линия, тренд – главная по площади компонента (первая – региональная) на профиле  $y = 0$  – синяя линия, результат вычитания тренда – зеленая линия

Fig. 4. Gravitational field of the model of three balls with DB – red line, trend is the main component in terms of area (the first is regional) on the profile  $y = 0$  – a blue line, the result of trend subtraction – a green line

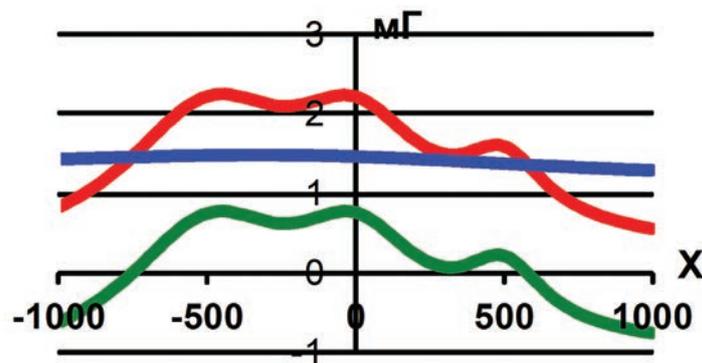


Рис. 5. Гравитационное поле над моделью из трех шаров с ГО – красная линия, тренд – поле, продолженное на высоту 1000 м на профиле  $y = 0$  – синяя линия, результат вычитания тренда – зеленая линия

Fig. 5. Gravitational field of the model of three balls with DB – red line, the trend is field extended to a height of 1000 m on the profile  $y = 0$  – blue line, result subtracting trend – green line

То есть истинным трендом оно не является, а отражает лишь приближенно общую тенденцию.

Снятие тренда с помощью спектрального анализа измеренного поля [2] неоднозначно. Очевидно, что высокочастотные составляющие поля связаны с приповерхностными неоднородностями, а низкочастотные – с глубинными, но функциональной связи между ними, которую можно было бы применить, математически установить невозможно. Удаление тех или иных частот имеет лишь интуитивное основание.

Попробуем разобраться в причинах сложившейся ситуации. Классический подход к интерпретации геофизических аномалий требует, чтобы профиль измерений выходил на асимптоты [1]. Но полиномиальная аппроксимация не имеет асимптот, метод главных компонент тоже этого не подразумевает. Продолжение поля вверх принципиально

может это сделать, но длину профиля придется увеличить на порядок, что не всегда возможно.

В качестве возможной альтернативы на стадии поисковых работ предлагается аналитическое продолжение наблюдаемого поля вниз [5, 6], как при наличии ГО, так и при его отсутствии. Оно не дает распределения избыточной плотности в разрезе (что требуется на стадии разведки), однако определяет положение аномальных масс и их отношения (рис. 6).

Как видно из рис. 6, результат определения положения и отношения масс аномалиеобразующих объектов (по площади и величине аномалий в разрезе) на основании аналитического продолжения поля практически не зависит от наличия мешающего крупного глубинного объекта (без предположений о его наличии) для задания положения и глубины разведочных скважин.

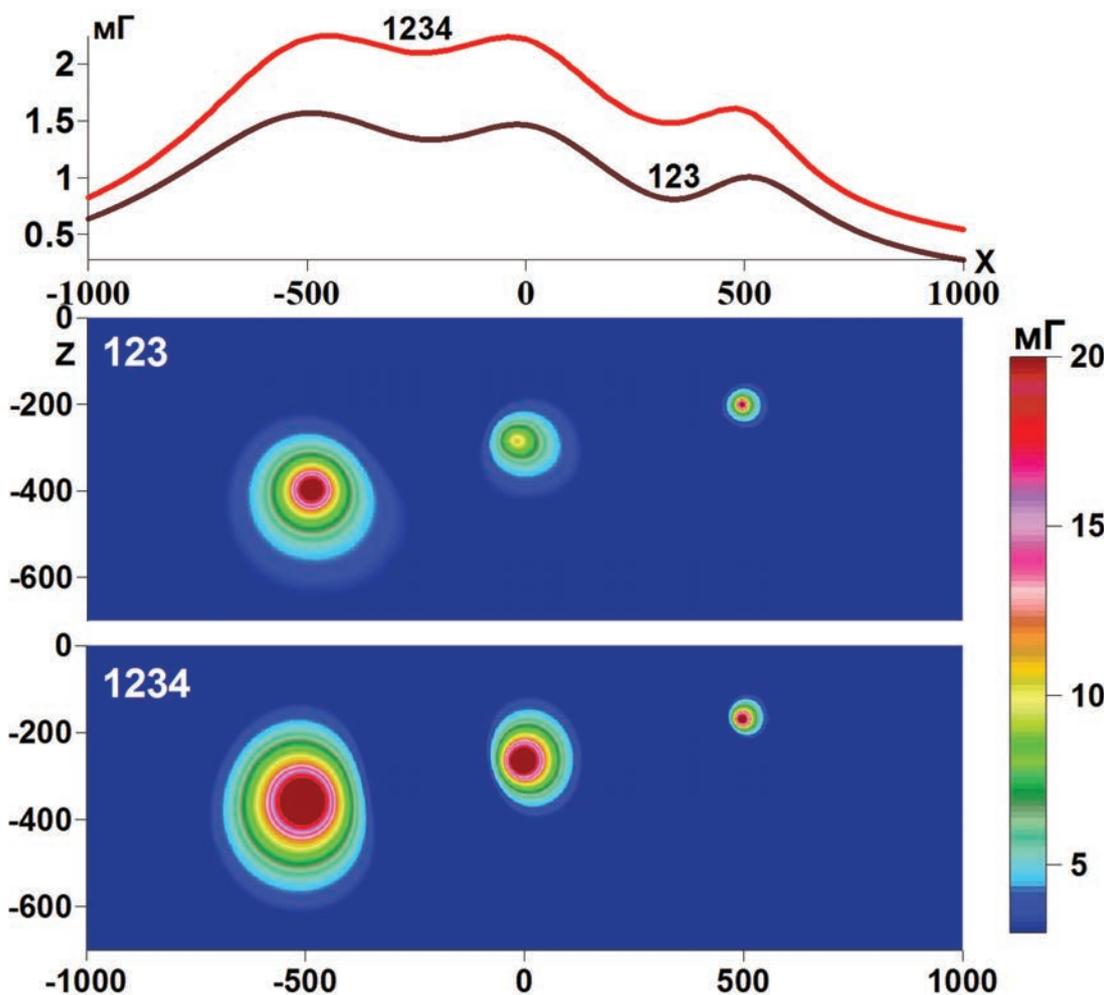


Рис. 6. Положение избыточных масс на основе аналитического продолжения гравитационного поля в нижнее полупространство для модели из трех шаров (в разрезе по профилю  $y = 0$ ) с глубинным шаром (1234) и без него (123)

Fig. 6. Position of excess masses based on the analytical continuation of the gravitational field for a model of three balls (in the section along the profile  $y = 0$ ) with a deep ball (1234) and without it (123)

### Вывод

Как показывает моделирование, снятие тренда приводит к ложным решениям ОЗ, что совпадает с утверждением в работе [3] и упоминается в качестве ссылки на работу А.К. Маловичко [1]. Эта трансформация может приводить к наводящим соображениям в плане определения геологических структур на первом этапе интерпретации, но не к конкретным числовым результатам, даже при фиксации положения аномалеобразующих объектов в пространстве. Таким образом, снятие тренда приводит лишь к оценочным суждениям и имеет ограниченную геоинформационную ценность.

Одной из задач данной работы было, в частности, подтверждение этого тезиса модельным примером.

Аналитическое продолжение поля является не полным, но наиболее объективным из возможных вариантов решения обратной задачи на поисковой стадии геофизических работ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б.А., Клушин И.Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. – Л. : Гостоптехиздат, 1962. – 495 с.
2. Бабаянц П.С., Тарарухина Н.М. Особенности технологии интерпретации комплексных аэрогеофизических данных в условиях широкого развития пород траппового комплекса // Современные аэрогеофизические технологии. – 2009. – Т. 1, вып. 1. – 40 с.
3. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий : учебное пособие. 2009. – 232 с.
4. Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: Российский сегмент // Физика Земли. – 2015. – № 2. – С. 3-20.

5. Ермохин К.М. Технология построения разрезов методом аналитического продолжения геофизических полей // Геоинформатика. – 2010. – № 2. – С. 51-60.
6. Ермохин К.М. Аналитическое продолжение гравимангнитных полей через массы // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 104-107.
7. Мартышко П.С., Пьянков В.А., Рублев А.Л. Анализ различных методов трансформации геофизических полей // Уральский геофизический вестник. – 2014. – №1 (23). – С. 55-60.

### REFERENCES

1. Andreev B.A., Klushin I.G. Geological interpretation of gravity anomalies. L. : Gostoptekhizdat, 1962. 495 p.
2. Babayants P.S., Tararukhina N.M. Features of the technology of interpretation of complex airborne geophysical data in the conditions of widespread development of rocks of the trap complex // Modern airborne geophysical technologies. 2009. V. 1, Issue 1. 40 p.
3. Bloch Yu.I. Interpretation of gravitational and magnetic anomalies : Tutorial. 2009. 232 p.
4. Gvishiani A.D., Lukyanov R.Yu. Geoinformatics and Observations of the Earth's Magnetic Field: Russian Segment // Physics of the Earth. 2015. No. 2. P. 3-20,
5. Ermokhin K.M. Technology of cut construction by the geophysical fields analytical continuation method // Geoinformatika. 2010. No. 2. P. 51-60.
6. Ermokhin K.M. Analytical continuation of gravimagnetic fields through masses // Reports of the Academy of Sciences. 2017. V. 476, No. 1. P. 104-107.
7. Martyshko P.S., Pyankov V.A., Rublev A.L. Analysis of different methods of geophysical fields transformations // Ural Geophysical Bulletin. 2014. No. 1 (23). P. 55-60.

### Информация об авторах

**Ермохин Константин Михайлович**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН). 194354, г. Санкт-Петербург, Менделеевская линия-3. E-mail: k\_m\_e@list.ru.

### Information about authors

**Ermokhin Konstantin Mikhailovich**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor; Leading Scientific al., Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial St. Petersburg branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Propagation N.V. Pushkova RAS (SPbF IZMIRAN). Mendelev Line-3, St. Petersburg, 194354, Russia. E-mail: k\_m\_e@list.ru.