

ОПТИМИЗАЦИЯ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТОХАСТИЧЕСКОМ СПОСОБЕ УЧЕТА РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АЭРОМАГНИТОРАЗВЕДКИ

© 2021 О.М. Муравина, И.А. Пономаренко

*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394018;
e-mail: muravina@geol.vsu.ru*

Приведены результаты исследований, направленных на оптимизацию стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки. Способ основан на последовательном применении метода эмпирической модовой декомпозиции и метода группового учета аргументов. В качестве фактических данных использованы результаты среднемасштабной аэромагнитной съемки, выполненной в Восточной Сибири. Показано, что предварительная классификация территории исследования по характеру рельефа и интенсивности аномального магнитного поля позволяет определить коррелируемые с рельефом компоненты магнитного поля в пределах выделенных классов. Для оценки качества корреляционных зависимостей использовано отношение среднеквадратичной невязки моделей к стандартному отклонению амплитуд магнитного поля анализируемой частотной компоненты. Это позволяет сравнить модели с различными статистическими характеристиками аномального магнитного поля и разделить компоненты на коррелируемые и некоррелируемые с рельефом. Полученные результаты подтверждают возможность существования сильных корреляционных взаимосвязей аномального магнитного поля и рельефа в определенном диапазоне пространственных частот и предлагают конкретные методические приемы применения данного стохастического подхода при редуцировании магнитного поля в областях развития платобазальтов.

Ключевые слова: аэромагнитная съемка, поправка за рельеф, статистические методы.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема учета рельефа местности при интерпретации данных магниторазведки стоит особенно остро в условиях сильно расчлененного рельефа местности, сложенного магматическими породами основного состава с неоднородными петромагнитными характеристиками. Традиционные способы введения поправки за влияние рельефа, основанные либо на решении прямой задачи магниторазведки для цифровой модели рельефа местности (детерминистский способ), либо на оценке корреляционной взаимосвязи между высотными отметками рельефа и аномальным магнитным полем (Долгаль, 2014; Ремпель, 1980), оказываются малоэффективными в сложных физико-геологических условиях. Применение детерминистского метода требует достоверной априорной информации о намагниченности горных пород, слагающих рельеф, а корреляционные взаимосвязи между высот-

ными отметками рельефа и аномальными значениями магнитного поля могут носить такой сложный и скрытый характер, что выявить их традиционными методами регрессионного анализа часто бывает сложно. Современное состояние проблемы подробно рассмотрено в работах (Долгаль, 2014; Долгаль и др., 2020; Долгаль, Червоный, 2008; Dolgal, 2019).

В 2017 г. был предложен принципиально новый способ решения задачи, когда связь между рельефом и магнитным полем ищется в определенных диапазонах пространственных частот (Dolgal et al., 2017). Практическая реализация этого подхода заключается в последовательном применении метода эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) (Долгаль, Христенко, 2017; Huang et al., 1998) и метода группового учета аргументов МГУА (Ивахненко, 1982; Муравина, 2012). Метод ЭМД позволяет представить аномальное магнитное поле (ΔT) и рельеф (H) в виде суммы эмпирических модовых функций

(ЭМФ), а МГУА выявляет наиболее тесные функциональные взаимосвязи между ЭМФ-составляющими магнитного поля и высотными отметками рельефа. Логично предположить, что источником этих компонент магнитного поля являются магнитные породы, слагающие рельеф, а оставшиеся составляющие, плохо коррелирующие с рельефом, обусловлены более глубинными источниками в земной коре, либо мелкими приповерхностными магнитными неоднородностями, не представляющими интереса при данном масштабе исследований. Первый опыт применения метода ЭМД в комплексе с МГУА на отдельных профилях дал положительные результаты и подтвердил перспективность предложенного подхода (Dolgal et al., 2017). Далее метод был использован при редуцировании результатов аэромагнитной съемки северо-западной части Сибирской платформы на территории включающей платобазальты плато Путораны (Долгаль и др., 2020). Методом ЭМД аномальное магнитное поле и высотные отметки рельефа были представлены в виде суммы шести компонент ЭМФ остаточных составляющих: $\Delta T = \delta T1 + \delta T2 + \dots + \delta T6 + \delta Tr$; $H = H1 + H2 + \dots + H6 + Hr$. Затем с помощью идентификационного анализа МГУА были установлены значимые статистические связи между низкочастотными компонентами $\delta T4 - \delta T6$, δTr и $H4$, $H5$ и Hr . Это позволило ввести поправку за рельеф, как суммарную компоненту поля, коррелирующую с рельефом местности, которая обеспечивает свыше 40% от энергии наблюдаемого поля. Однако полностью исключить влияние рельефа не удалось, и в редуцированном поле присутствует остаточный аномальный эффект от платобазальтов (Долгаль и др., 2020). Одной из причин этого стала существенная неоднородность территории по характеру магнитного поля и рельефа, из-за которой универсальная единая оценка поправки за рельеф, как суммы составляющих $\delta T4 - \delta T6$ и остаточной составляющей, в различных частях площади исследований была в разной степени эффективной.

С учетом сказанного с целью оптимизации идентификационного моделирования МГУА нами было выполнено пространственное районирование территории с использованием модуля Spatial Analyst в системе ArcGIS 9 (Spatial Analyst, 1999–2001) на основе совместного качественного анализа амплитуд аномального магнитного поля и высотных отметок рельефа. В результате площадь исследования была разделена на классы с учетом особенностей магнитного поля и рельефа. На заключительном этапе было проведено идентификационное моделирование МГУА в пределах выделенных классов и определены взаимосвязанные с рельефом составляющие магнитного

поля. Обоснование оптимизированной методики и результаты представлены в настоящей статье.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных были использованы результаты аэро-магнитных съемок северо-западной части Сибирской платформы масштаба 1:100 000–1:50 000, выполненных в 1962–1981 гг., и высотные отметки дневного рельефа. Данные были интерполированы в сеть 2×2 км. Общая площадь исследования составляет ~316000 км² (Долгаль и др., 2020).

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Стохастический способ редуцирования магнитного поля основан на последовательном использовании метода ЭМД и МГУА. Методом ЭМД осуществляется разложение дискретных значений поля ΔT и высот H на эмпирические моды по всей площади исследования, затем выполняется идентификационный анализ МГУА в пределах отдельных блоков, выделенных на основе процедуры реклассификации и совместного анализа магнитного поля и рельефа участков. Целью идентификационного анализа является выявление компонент магнитного поля, наиболее тесно взаимосвязанных с компонентами рельефа.

Как уже отмечалось, в пределах территории исследования визуально выделяются блоки, резко отличающиеся по характеру аномального магнитного поля и рельефа, что опосредованно отражает неоднородность геологического строения земной коры. Очевидно, что теснота и характер взаимосвязи магнитного поля и рельефа в пределах различных блоков не может быть одинаковой. Исходя из этого был выполнен комплексный пространственный анализ магнитного поля и высотных отметок рельефа, позволивший выполнить районирование территории и выделить блоки, с различными особенностями анализируемых признаков. В соответствии с задачами исследования в качестве классификационных признаков были использованы интенсивность аномального магнитного поля и высотные отметки рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате реклассификации признаков их значения были приведены к единой условной шкале. В качестве признаковой шкалы были взяты целые числа в интервале от 1 до 2, что разделяет каждый из признаков на два класса. Выбор такого интервала является произвольным и отражает

только степень градации формализованных значений признаков (интенсивность аномалий) в некоторой условной шкале. Основанием для выбора именно такой шкалы стала, главным образом, необходимость получения максимально генерализованного разбиения территории на классы и, частично, выявленные статистические характеристики аномалий магнитного поля и высот рельефа по всему региону исследований. Интенсивность магнитных аномалий меняется от -501 нТл до $+698$ нТл, среднеквадратическое отклонение составляет ± 178 нТл. Максимальные отметки высот рельефа достигают 1575 м, среднее значение равно 335 м, стандартное отклонение равно 302 м. На основании статистических оценок для магнитного поля выделено два класса: отрицательные и слабо положительные аномалии интенсивностью до 100 нТл и положительные аномалии свыше 100 нТл. Для рельефа граница классов прошла по отметке 800 м. Результаты реклассификации приведены в таблице. Таким образом, площадь исследований по анализируемому признаку была разделена на четыре класса (рис. 1).

Идентификационное моделирование МГУА было выполнено на 10 пилотных профилях автономно для каждого класса. В результате получены модельные уравнения, связывающие значения магнитного поля анализируемой компоненты с двумя и более компонентами рельефа $\delta T_i = f(H_j...H_k)$. Все модельные уравнения представляют собой различные варианты полинома Колмогорова-Габора 1 — 3 степени с ковариациями (Ивахненко 1982; Муравина, 2012). Генерация и выбор лучших модельных зависимостей осуществлялись с помощью программы, реализующей многорядный комбинаторный алгоритм МГУА (Муравина, Пономаренко, 2016). В соответствии с методикой МГУА лучшие модельные зависимости выбирались по минимальным значениям внешних критериев. Поскольку в пределах профиля статистические характеристики интенсивности магнитного поля и его частотных компонент меняются в широких пределах, в качестве независимой оценки качества итоговых моделей использовалось отношение среднеквадратичной невязки модельных и наблюдаемых значений ЭМФ магнитного поля ($\delta 1$) к стандартному отклонению значений магнитного поля анализируемой последовательности наблюдений ($\delta 2$): $\delta 1/\delta 2$. Для наглядности на рис. 2 представлены модельные и наблюдаемые значения ЭМФ магнитного поля с различными значениями $\delta 1/\delta 2$ для одного из профилей.

Среднее значение предложенной оценки для всех рассчитанных моделей составляет 0.4 , а пределы изменения от 0.01 до 0.75 . Визуальное представление модельных и эмпирических зна-

Реклассификация для аномального магнитного поля и высотных отметок рельефа

Reclassification table for anomalous magnetic field and elevation markers

Магнитное поле (нТл)	Высотные отметки рельефа (м)	
	$0 \div 799$	$800 \div 1575$
$-500 \div 99$	1 класс δT_r	3 класс δT_b
$100 \div 700$	2 класс $\delta T_3 - \delta T_6, \delta T_r$	4 класс $\delta T_6, \delta T_r$

Примечание. 1 класс: $\Delta T = (-500 \div 99)$ нТл, $H = (0 \div 799)$ м; 2 класс: $\Delta T = (100 \div 700)$ нТл, $H = (0 \div 799)$ м; 3 класс: $\Delta T = (-500 \div 99)$ нТл, $H = (800 \div 1575)$ м; 4 класс: $\Delta T = (100 \div 700)$ нТл, $H = (800 \div 1575)$ м. В ячейках таблицы для каждого класса указаны наиболее тесно коррелируемые с рельефом ЭМФ-составляющие магнитного поля, установленные по результатам МГУА.

Symbols for the table. 1 class: $\Delta T = (-500 \div 99)$ nTl, $H = (0 \div 799)$ m; 2 class: $\Delta T = (100 \div 700)$ nTl, $H = (0 \div 799)$ m; 3 class: $\Delta T = (-500 \div 99)$ nTl, $H = (800 \div 1575)$ m; 4 class: $\Delta T = (100 \div 700)$ nTl, $H = (800 \div 1575)$ m. The cells of the table for each class indicate the IMF components of the magnetic field, which are most closely correlated with the relief, as determined by the MGHA results.

чений ЭМФ магнитного поля (рис. 2) показывает, что для моделей с значением $\delta 1/\delta 2 \leq 0.3$ наблюдается уверенная корреляция ЭМФ-составляющих магнитного поля с рельефом, на основании чего значение 0.3 принято пороговым для разделения частотных компонент на коррелируемые и некоррелируемые с рельефом. В таблице для каждого класса указаны компоненты магнитного поля, обусловленные влиянием рельефа, которые были определены по результатам осреднения значения $\delta 1/\delta 2$ моделей, полученных для ЭМФ-составляющих магнитного поля по 10 пилотным профилям (рис. 3).

Таким образом, результаты исследований доказывают перспективность стохастического подхода к оценке поправки за рельеф и необходимость развития практических методических приемов его реализации.

Очевидно, что приведенный в работе пример реклассификации площади на четыре класса является простейшим и лишь одним из возможных вариантов. Так в качестве признаков можно использовать не только интенсивность поля и высотных отметок рельефа, а также их градиентные или статистические характеристики. Детальность разделения площади исследования на классы должна зависеть от степени неоднородности рельефа и магнитного поля. Предложенная относительная оценка качества модельных

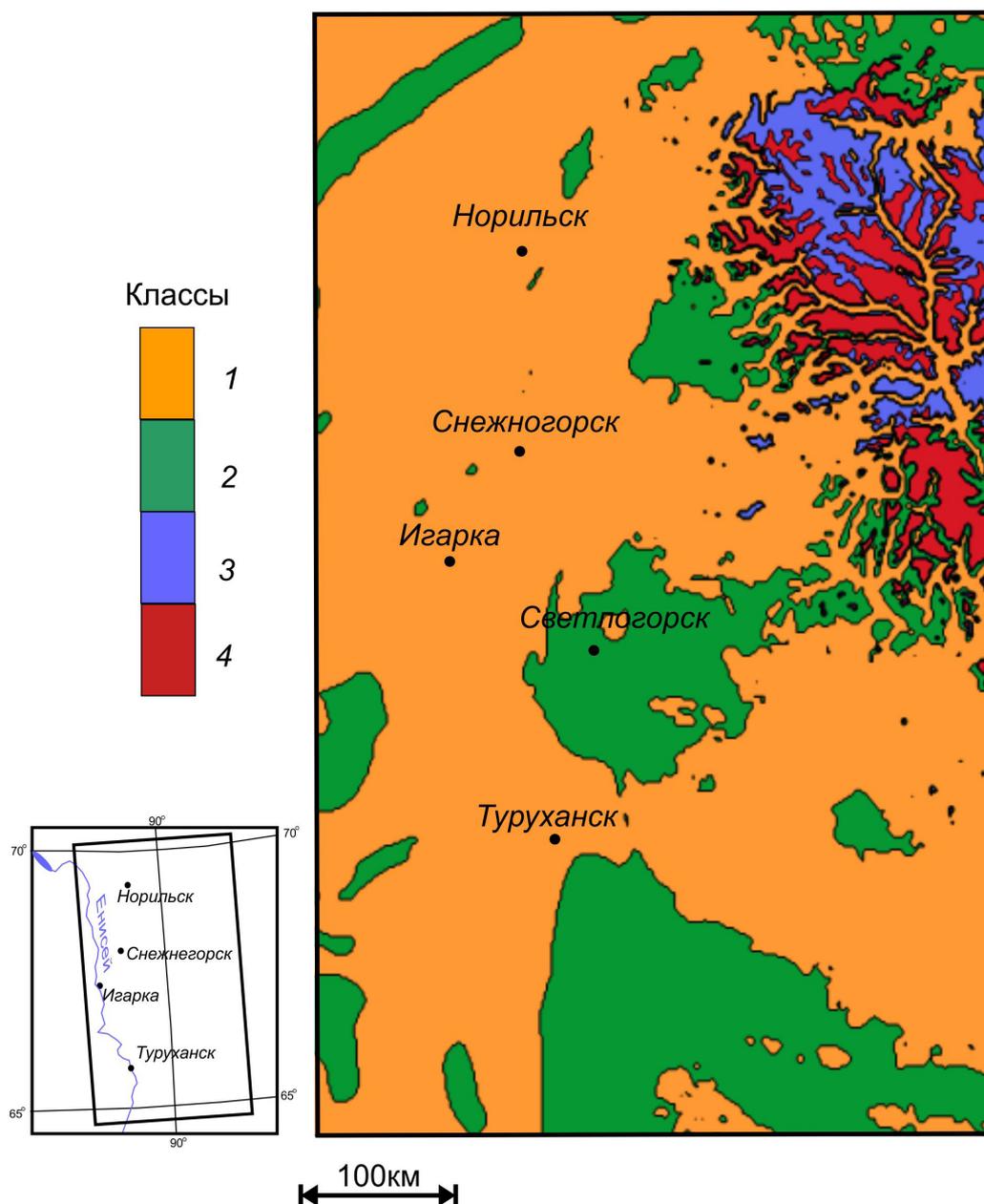


Рис. 1. Пространственная типизация площади исследования по значению комплексного признака.

Fig. 1. Spatial typing of the study area by the value of a complex feature.

уравнений ($\delta 1/\delta 2$) позволяет сравнить модели с разными статистическими характеристиками зависимой переменной. Выбор порогового значения, ниже которого анализируемая компонента магнитного поля однозначно коррелируется с рельефом (в нашем случае $\delta 1/\delta 2 = 0.3$), требует дальнейшего исследования, например, с использованием хорошо зарекомендовавших себя методик, реализованных в технологии КОСКАД-3Д (Трусов, Петров, 2000; Петров и др., 2010).

ВЫВОДЫ

Полученные результаты подтверждают правомерность идеи о существовании сильных

корреляционных взаимосвязей интенсивности магнитного поля и высотных отметок рельефа дневной поверхности в определенном диапазоне пространственных частот. Предположительной геологической природой этого могут являться существенные различия петромагнитных свойств вулканогенных образований разного возраста — вертикальная зональность толщи. Соответственно, магнитные аномалии, обусловленные входящими в ее состав лавами и туфами, будут нелинейно зависеть от уровня эрозионного среза, причем эти зависимости в каждой конкретной ситуации будут осложнены влиянием постмагматических субвертикальных перемещений блоков (Криволицкая, 2014; Левин и др. 2018).

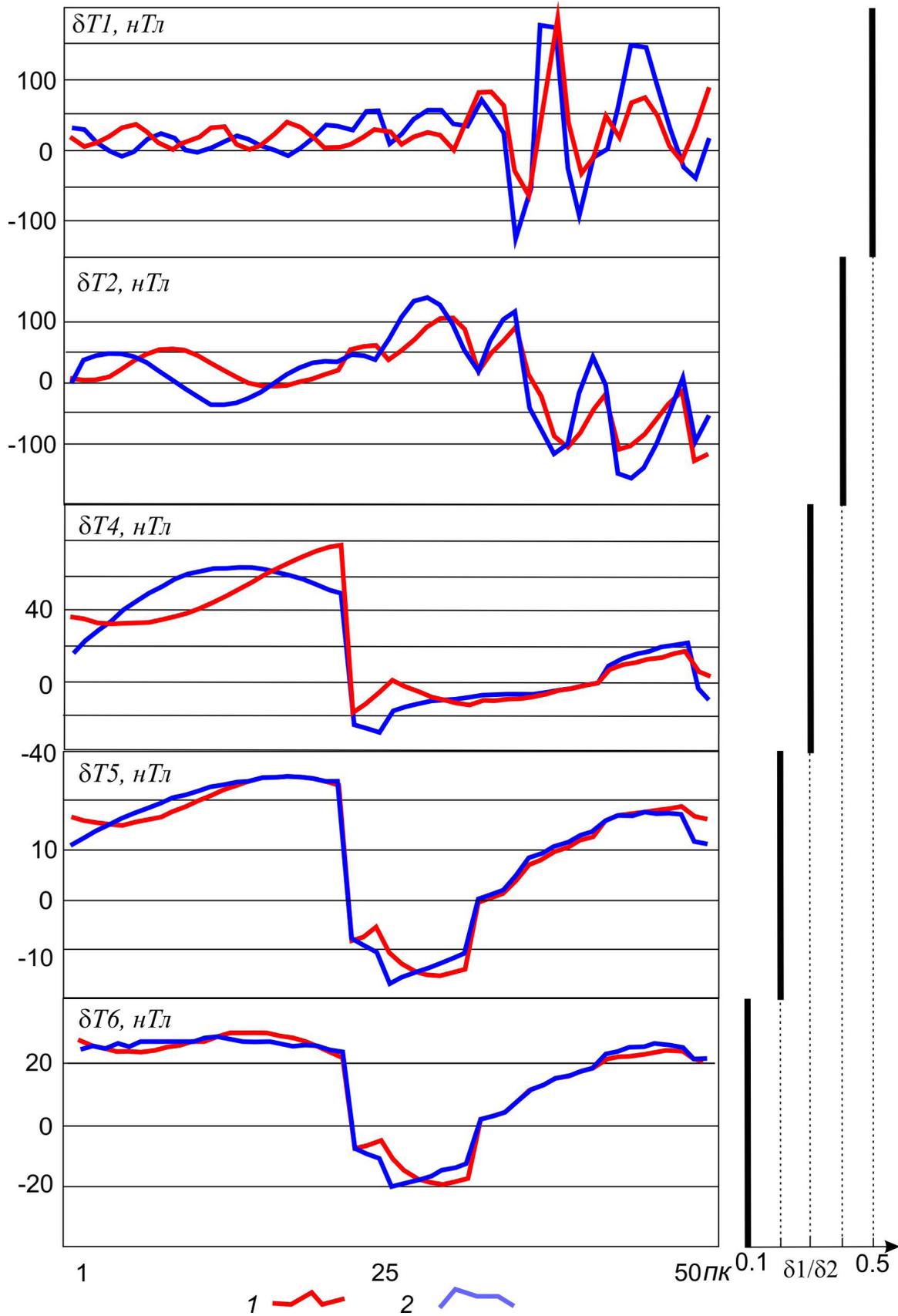


Рис. 2. Модельные (1) и наблюдаемые (2) значения разночастотных ЭМФ магнитного поля с различными значениями относительного критерия точности моделирования $\delta 1/\delta 2$.

Fig. 2. Model (1) and observed (2) values of different frequency IMFs of the magnetic field with different values of the relative criterion of modeling accuracy $\delta 1/\delta 2$.

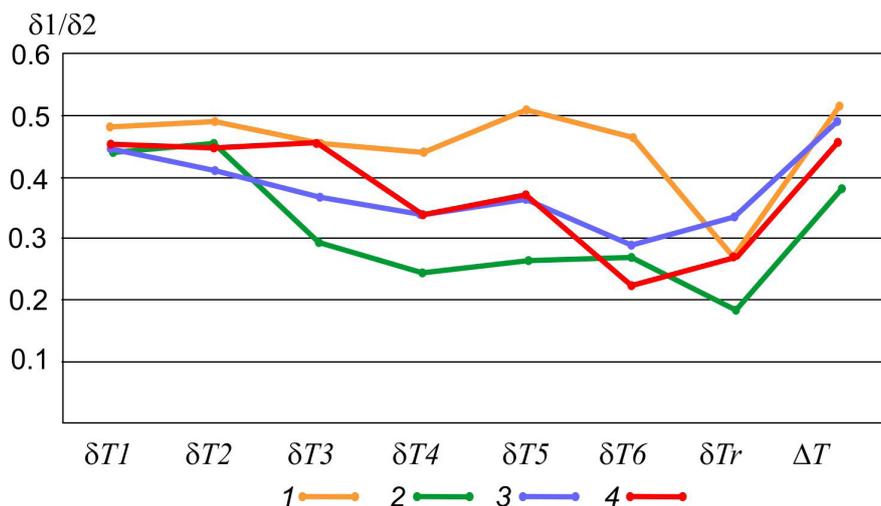


Рис. 3. Средние значения $\delta 1/\delta 2$ для моделей, полученных для ЭМФ-составляющих магнитного поля в пределах выделенных классов в соответствии с таблицей: 1 — класс 1; 2 — класс 2; 3 — класс 3; 4 — класс 4.

Fig. 3. The average values of $\delta 1/\delta 2$ for the models obtained for the IMF components of the magnetic field within the selected classes in accordance with the table: 1 — class 1; 2 — class 2; 3 — class 3; 4 — class 4.

Идентификационное моделирование МГУА позволяет найти полиномиальные зависимости, при этом структура и параметры модельных уравнений могут довольно сильно отличаться даже в пределах одного профиля, что связано с естественной изменчивостью физико-геологической ситуации, кратко охарактеризованной выше.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РФФИ 19-05-00654-А.

Список литературы [References]

- Ивахненко А.Г.* Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наукова думка, 1982. 296 с. [*Ivakhnenko A.G.* Inductive method of self-organization of models of complex systems. Kiev: Naukova dumka, 1982. 296 p. (in Russian)].
- Долгаль А.С.* Магниторазведка: компьютерные технологии учета влияния рельефа местности. Пермь, Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та. 2014. 92 с. [*Dolgal A.S.* Magnetic: computer technology of considering the influence of the terrain. Perm, Perm State National Research University Press, 2014. 92 p. (in Russian)].
- Долгаль А.С., Криволицкая Н.А., Муравина О.М., Пономаренко И.А.* Учет влияния рельефа земной поверхности при аэромагнитной съемке в пределах больших магматических провинций // Геофизика. 2020. № 4. С. 2–8 [*Dolgal A.S., Krivolutskaya N.A., Muravina O.M., Ponomarenko I.A.* Accounting the effect of terrain relief during aeromagnetic surveying within large magmatic provinces // *Geofizika*. 2020. № 4. P. 2–8 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Христенко Л.А.* Применение эмпирической модовой декомпозиции при обработке геофизических данных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 100–108 [*Dolgal*

A.S., Hristenko L.A. Application of Empirical Mode Decomposition Method in processing of geophysical data. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2017. Т. 328. № 1. P. 100–108. (in Russian)].

Долгаль А.С., Червоный Н.П. Учет влияния рельефа земной поверхности при аэромагнитных измерениях // Геоинформатика. 2008. № 2. С. 58–66 [*Dolgal A.S., Chervony N.P.* Taking into account the influence of the relief of the Earth's surface during aeromagnetic measurements // *Geoinformatics* 2008. № 2. P. 58–66 (in Russian)].

Криволицкая Н.А. Эволюция траппового магматизма и Pt-Cu-Ni рудообразования в Норильском районе. Товарищество научных изданий КМК, 2014. 305 с. [*Krivolutskaya N.A.* Evolyuciya trappovogo magmatizma i Pt-Cu-Ni rudo-obrazovaniya v Noril'skom rajone. Tovarithchestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2014. 305 p. (in Russian)].

Левин Ф.Д., Контарович О.Р., Смирнов А.С., Прозорова Г.В. Новые данные о строении трапповых полей южной части Восточной Сибири по материалам аэрогеофизических съемок // Мониторинг. Наука и технологии. 2018. № 4 (37). С. 13–24 [*Levin F.D., Kontarovich O.R., Smirnov A.S., Prozorova G.V.* New information about the structure of trap rock plateaus of southern part of Eastern Siberia according to airborne geophysical data // *Monitoring. Science and Technologies*. 2018. № 4 (37). P. 13–24 (in Russian)].

Муравина О.М. Метод группового учета аргументов при анализе геофизических данных // Геофизика. 2012. № 6. С. 10–20 [*Muravina O.M.* Method of group accounting of arguments in the analysis of geophysical data // *Geofizika*. 2012. № 6. P. 10–20 (in Russian)].

Муравина О.М., Пономаренко И.А. Программная реализация метода группового учета аргументов при идентификационном моделировании геолого-геофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2016. № 2. С. 107–110 [*Muravina O.M., Ponomarenko*

- I.A.* Features of application of the group method of data handling at identification modelling of geologic-geophysical data // *Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology*. 2016. № 2. P. 107–110 (in Russian).
- Трусов А.А., Петров А.В.* Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // *Геофизика*. 2000. № 4. С. 29–33 [*Trusov A.A., Petrov A.V.* Computer technology of statistical and spectral-correlation analysis of three-dimensional geoinformation – KOSKAD 3D // *Geofizika*. 2000. № 4. P. 29–33 (in Russian)].
- Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели.* Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D». Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 126–132 [*Petrov A.V., Yudin D.B., Khou Syueli.* Processing and interpretation of geophysical information by methods of probabilistic - statistical approach using «KOSKAD 3D» computer technology // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2010. № 2(16). P. 126–132 (in Russian)].
- Ремпель Г.Г.* Актуальные вопросы методики введения поправок, связанных с рельефом местности в данные гравиразведки и магниторазведки // *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1980. № 12. С. 75–89 [*Rempel G.G.* Topical issues of the methodology for introducing corrections related to the terrain in the data of gravity and magnetic exploration // *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*. 1980. № 12. P. 75–89 (in Russian)].
- Muravina O.M., Davudova E.I., Ponomarenko I.A.* Possibility of identification of modeling in complex analysis geological and geophysical data / *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences - Springer Nature Switzerland AG*, 2019. P. 157–162.
- Dolgal A.S., Muravina O.M., Hristenko L.A.* The reduction of the magnetic field within development areas of the plateaubasalts // *Geoinformatics 2017. 15–17 May 2017, Kiev, Ukraine. 11143_ENG. Electronic publication (CD)*.
- Dolgal A.S.* Allowance for the Earth's Surface Topography in Processing the Magnetic Field Measurements // *Nurgaliev D., Khairullina N. (eds). Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer Nature Switzerland AG*, 2019. P. 3–12. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_12
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R. et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. // *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1998. T. 454. P. 903–995.
- Spatial Analyst. User guide. 1999-2001 ESRI.* <https://docplayer.com/35943645-Spatial-analyst-rukovodstvo-polzovatelya.html>

OPTIMIZATION OF IDENTIFICATION MODELING IN THE STOCHASTIC METHOD OF TAKING INTO ACCOUNT THE TERRAIN IN THE INTERPRETATION OF AEROMAGNETIZATION

O.M. Muravina, I.A. Ponomarenko

Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018

The results of studies aimed at optimizing the stochastic method of taking into account the terrain when interpreting aeromagnetic survey data are presented. The method is based on the consistent application of the method of empirical mode decomposition and the method of group accounting of arguments. The results of a medium-scale aeromagnetic survey conducted in Eastern Siberia were used as actual data. It is shown that the preliminary classification of the studied territory by the nature of the relief and the magnetic field strength allows us to determine the components of the magnetic field that correlate with the relief within the selected classes. To assess the quality of correlation dependencies, the ratio of the standard deviation of the models to the variance of the magnetic field amplitudes of the analyzed frequency component were used. This allows us to compare models with different statistical characteristics of the anomalous magnetic field and divide the components into correlated and uncorrelated with the terrain. The results obtained confirm the possibility of the existence of strong correlational relationships between the magnetic field and the relief in a certain range of spatial frequencies and offer specific methodological methods for applying this stochastic approach to reducing the magnetic field in the areas of the development of platobasalts.

Keywords: aeromagnetic survey, correction for relief, statistical methods.

Поступила в редакцию 20.05.2021
После доработки 03.09.2021
Принята в печать 27.09.2021