

УДК 550.83.05:004.85

Автоматизация контроля данных электротомографии и магниторазведки с применением искусственного интеллекта

■ Кричинский А.К.¹, Буддо И. В.^{1,2}, Поспеев А. В.¹, Черных А.А.¹

¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

² Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

Аннотация. При совместной интерпретации электротомографии и магниторазведки ошибки измерений и неустойчивость обратной задачи могут привести к выделению ложных геологических объектов. Цель исследования - оценить возможности искусственного интеллекта для автоматизации контроля результатов инверсии с учётом того, как выявленные ошибки влияют на восстановленный разрез. В расчётном теоретическом кейсе для модели с зоной повышенной электропроводности и магнитной восприимчивости и немагнитной проводящей линзой получены синтетические электрические и магнитные отклики. Обнаружение ошибок инверсии методом случайного леса (Random forest) объединено со взаимным контролем измерений, повторной инверсией и оценкой устойчивости трансформаций магнитного поля. На модельных разрезах полнота обнаружения ошибок составила 91,3% против 77,4% у нормированного взаимного контроля. В демонстрационном кейсе исключение выявленных ошибок уменьшило погрешность предсказания незашумлённого электрического отклика с 6,50 до 1,40%, при этом немагнитная проводящая линза сохранилась в разрезе. Обучаемый контроль в таком варианте может использоваться для предварительного отбора результатов инверсии и объектов, требующих дополнительной проверки. В дальнейшем целесообразно верифицировать эффективность предложенной методики на полевых материалах.

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация, электротомография, магниторазведка, случайный лес, контроль качества, устойчивость инверсии, опасные геодинамические процессы.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных при наземных и аэро-беспилотных исследованиях как основа для прогнозирования опасных геодинамических процессов при освоении недр и строительстве в природно-климатических условиях Российской Арктики и сопредельных территорий» Министерства науки и высшего образования РФ в молодежной лаборатории прогнозирования георисков ИЗК СО РАН.

Введение

Методы электротомографии и магниторазведки широко применяются в цикле геологоразведочных работ на рудные полезные ископаемые, а также при прогнозировании опасных геодинамических процессов: деградации многолетнемерзлых пород, разрушения бугров пучения, наблюдаемых на полуостровах Ямал и Гыдан, а также образования катастрофических провалов грунта. Выявление разломных зон и

непосредственно оруденений в геофизических полях является актуальной задачей. При картировании разломных зон необходимо выделить неоднородности разреза и установить, насколько надёжно они картируются при решении обратной задачи геофизических методов. Электротомография и магниторазведка дают сведения о разных свойствах среды: распределении удельного электрического сопротивления

и намагниченности. Их сочетание применяют при изучении тектонических нарушений и структурного контроля оруденения [1, 2, 5]. Однако простое совпадение аномалий ещё не подтверждает их природу, а геологически значимый объект может выделяться только одним методом.

Вместе с тем, геофизические данные всегда содержат погрешности ввиду влияния естественного и антропогенного шума, методических ошибок при проведении полевых работ. При многоэлектродных измерениях одни и те же электроды входят в разные установки, поэтому нарушение условий измерения способно затронуть целую группу отсчётов. А.А. Бобачев с соавторами [1] рассматривали ошибки, связанные с поляризацией электродов при их последовательном использовании в качестве питающих и приёмных. Но и удаление вероятно некондиционных значений требует обоснования: вместе с ошибкой можно потерять и полезный сигнал. При автоматической обработке выбранное правило распространяется на весь материал без просмотра каждого отсчёта записи.

Даже после контроля геофизических данных неоднозначность интерпретации сохраняется. D.W. Oldenburg и Y. Li [13] на синтетических примерах и материалах месторождения Century показали необходимость ограничивать интерпретацию глубиной исследования: часть структур модели, полученной по результатам инверсии, слабо проявляется в наблюдаемых геофизических полях. Хорошее совпадение рассчитанного поля с наблюдаемым само по себе не гарантирует достоверности выявления таких структур.

При обработке магнитных данных производные и фильтры также могут создавать основания для ошибочной интерпретации. Производные усиливают высокочастотный шум, а положение выделяемых границ зависит от выбранной трансформанты и свойств источника. Эти вопросы рассмотрены G.R.J. Cooper и D.R. Cowan при исследовании

фазовых фильтров и обобщённых производных потенциальных полей [8, 9].

Цель настоящего исследования – оценить возможности искусственного интеллекта для автоматизации контроля результатов инверсии с учётом того, как выявленные ошибки влияют на восстановленный разрез. В работе оцениваются полнота обнаружения ошибок по совокупности признаков и устойчивость восстановленных объектов при изменении условий инверсии. Использование синтетики даёт возможность отдельно выполнить контроль качества измерений и инверсии, поскольку истинное положение объектов и неискажённый (теоретический) отклик заданы априорно.

Материалы и методы

В электротомографии (ЭТ; ERT на рисунках) измеряют разность потенциалов на приёмной паре электродов при пропускании тока через питающую пару. Произведение отношения измеренной разности потенциалов к току на геометрический коэффициент определяет кажущееся удельное электрическое сопротивление. Инверсия этих данных позволяет восстановить распределение удельного электрического сопротивления (УЭС), зависящего от состава пород, флюида и порового пространства [1, 3, 11]. Магниторазведка регистрирует изменения магнитного поля, обусловленные неоднородностью магнитных свойств пород [6].

Схема автоматизации приведена на рис. 1. Измерение, признанное вероятно некондиционным одновременно методом случайного леса (Random forest) и обычным взаимным контролем с порогом 0,15, исключается из набора для проверочной инверсии. Если оценки расходятся, измерение отбирается для просмотра специалистом. Исходные отсчёты сохраняются вместе с основаниями исключения и версией классификатора.



▲ Рис. 1. Последовательность обучения классификатора, контроля измерений и проверочной инверсии.

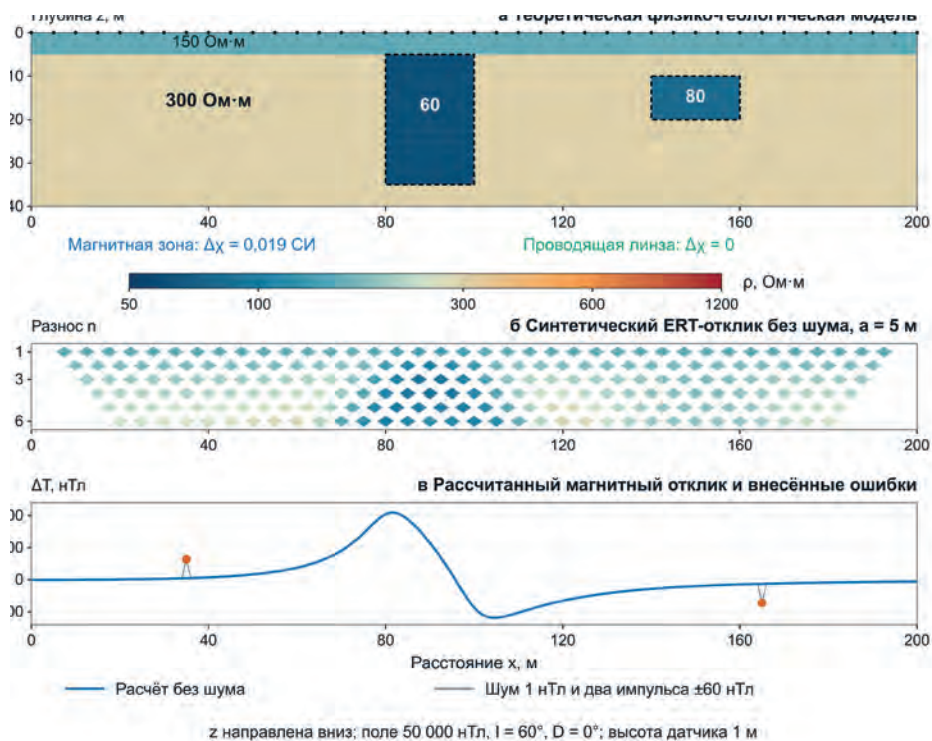
Автоматическое исключение применяется только при совпадении двух критериев; при этом ошибочная отбраковка полностью не исключается. Поэтому результат контроля оценивается не по числу удалённых отсчётов, а по изменению восстановленного разреза.

Для тестирования предложенного подхода использован полностью синтетический набор данных, включающий серию

модельных разрезов для обучения и проверки классификатора и отдельный расчётный кейс для анализа влияния ошибок измерений на результаты инверсии.

В демонстрационной модели задано проводящее тектоническое нарушение с выраженными магнитными свойствами и проводящая линза без магнитного контраста (рис. 2). Такое сочетание позволяет проверить как выявление объекта по

► Рис. 2. Расчётный теоретический кейс: модель среды, кажущиеся УЭС и магнитный отклик. Проводящая линза справа не имеет контраста магнитных свойств.



двум геофизическим методам, так и сохранение электрической неоднородности при отсутствии соответствующей магнитной аномалии. Параметры и геометрия модели приведены на рис. 2.

Синтетические данные ЭТ рассчитывали методом конечных объёмов в постановке 2,5D [10], магнитный отклик – для модели индуцированной намагниченности [6]. Использовали 41 электрод с шагом 5 м, диполи 5 и 10 м и разносы $n = 1-6$; всего 393 значения кажущегося УЭС на один разрез. Расчёты выполнялись программно с использованием кода. Корректность прямых расчётов контролировалась сравнением с независимыми решениями и расчётами при различной дискретизации.

Оранжевыми маркерами на магнитном отклике показаны положения двух искусственно внесённых импульсных ошибок ± 60 нТл.

Для автоматического выявления некондиционных измерений использован метод случайного леса (Random forest) [7]. Классификатор анализировал совокупность признаков, характеризующих расхождение прямых и взаимных измерений, локальные отклонения сигнала и уровень шума. Координаты измерений и истинные параметры синтетической модели при обучении не использовались.

Под дефектом далее понимается искусственно внесённое искажение измерения, используемое как эталонная ошибка при обучении и тестировании; случайный шум моделировался отдельно.

Обучающая серия включала 20 синтетических разрезов с различными положением, геометрией и сопротивлением объектов. Для каждого разреза формировались шумовые реализации с искусственно внесёнными ошибками. Разрезы разделяли на обучающую, валидационную и тестовую выборки без смещения реализаций одной модели между выборками.

Результаты классификатора сравнива-

ли с традиционным взаимным контролем и его нормированным вариантом. Пороговые значения определяли по валидационной выборке при ограничении доли ложных срабатываний.

В демонстрационном кейсе в синтетические данные ЭТ были внесены случайный шум и группа систематически искажённых измерений. После их автоматического выявления выполнялась повторная инверсия с теми же настройками, что и для исходного набора данных. Дополнительно проверялась устойчивость результата к изменению параметров регуляризации и начальной модели [3, 11]. В магнитные данные также вводились шум и импульсные ошибки с последующим контролем повторных измерений.

Для интерпретации магнитного поля рассчитывали модуль горизонтальной производной (THG), вертикальную производную, Tilt и амплитуду аналитического сигнала [6, 8, 12]. Для снижения влияния высокочастотного шума перед дифференцированием применялось продолжение поля вверх.

Трансформанты сравнивали по контрастности выделяемых границ, устойчивости их положения при изменении уровня шума и параметров обработки и пространственному соответствию границам, установленным по данным ЭТ. По этим характеристикам рассчитывался условный рейтинг I, предназначенный только для сравнительной оценки трансформант.

Для объектов электрического разреза дополнительно рассчитывался индекс приоритета проверки A. Он учитывал устойчивость неоднородности при изменении параметров инверсии, влияние исключённых измерений на соответствующую область модели и наличие магнитной поддержки. Высокое значение A означало необходимость первоочередного просмотра объекта специалистом.

Индекс A использовался только для

ранжирования и не интерпретировался как вероятность артефакта; отсутствие магнитной аномалии само по себе не повышало приоритет проверки.

Результаты

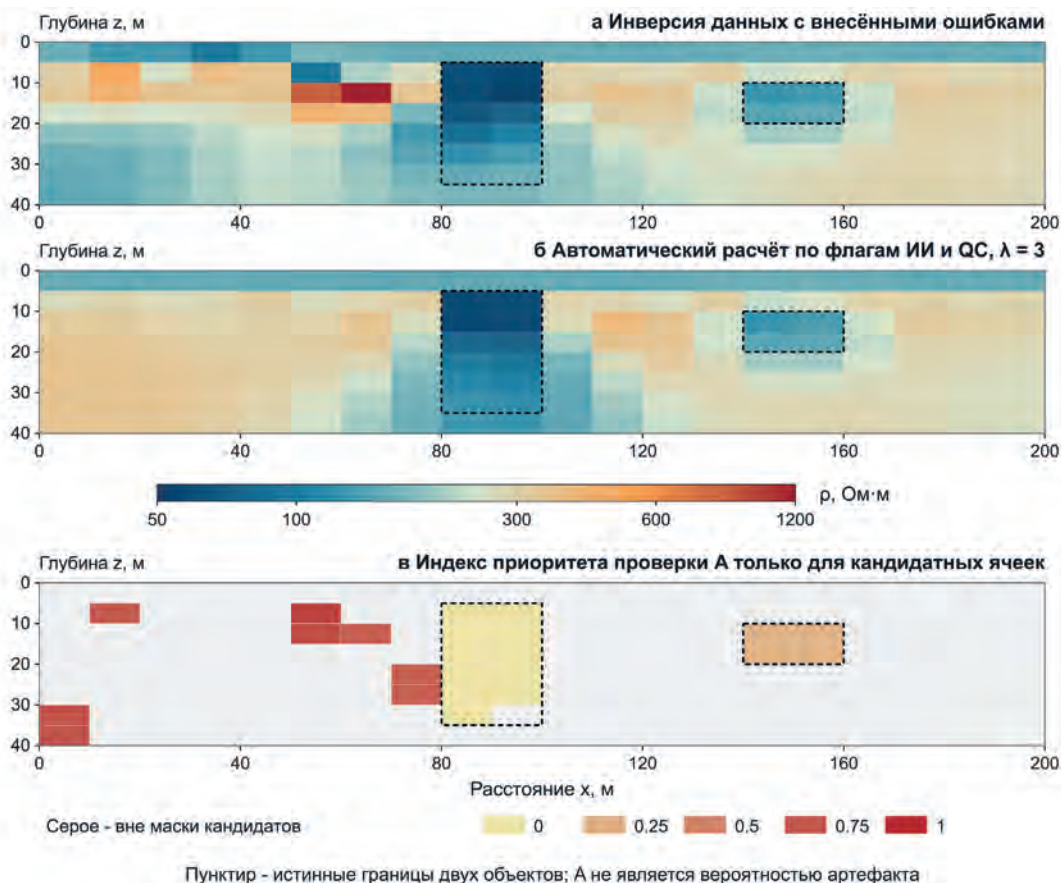
На четырёх тестовых разрезах методом случайного леса (Random forest) обнаружено 91,3% внесённых ошибок. Полнота нормированного взаимного контроля составила 77,4%, обычного контроля с порогом 0,15 – 71,7%. Доли ложных срабатываний среди исправных измерений равны соответственно 0,37, 0,75 и 0,15%. В случае применения метода случайного леса (Random forest) 93,0% помеченных измерений действительно содержали ошибки; полнота на отдельных разрезах находилась в пределах 90,0-92,3%.

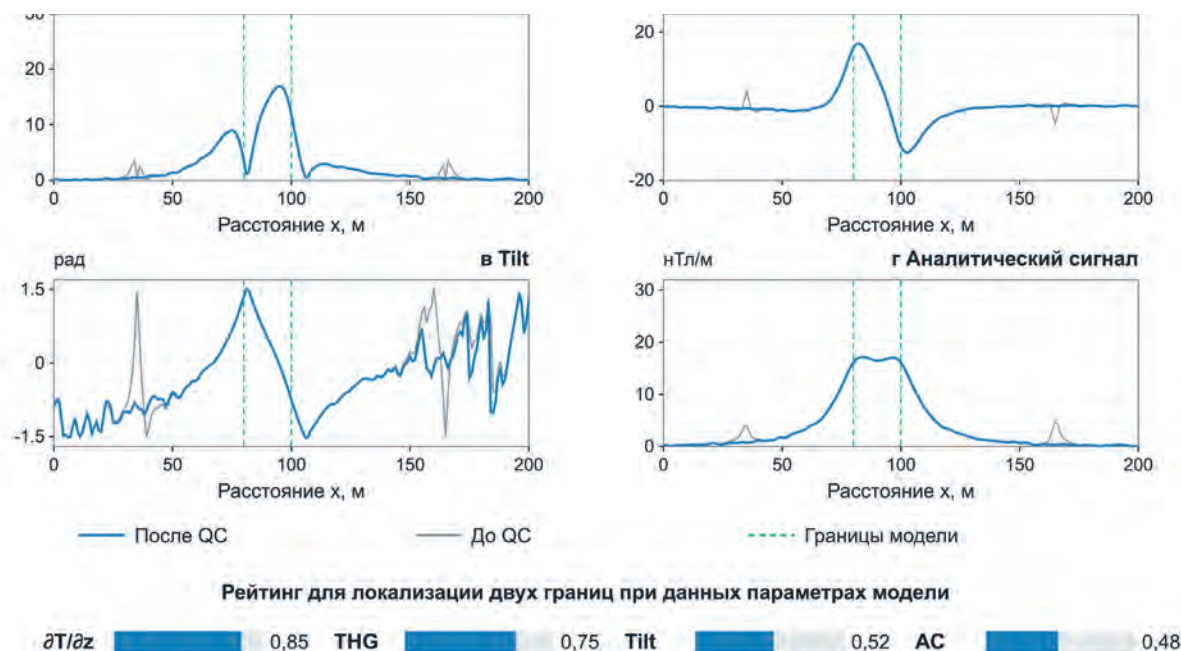
Эти значения относятся к классификатору до согласования с взаимным контролем. После согласования из 31 440 тестовых измерений для проверочного расчёта

исключены 1176, в том числе 30 кондиционных. Ещё 410 измерений отобраны для просмотра, из них 316 содержат внесённую ошибку. Среди измерений, не помеченных ни одним способом, осталось 138 дефектов. Это различие необходимо учитывать при оценке полноты автоматического контроля.

В демонстрационном кейсе все одиннадцать сильных искажений обнаружены и методом случайного леса (Random forest), и обычным взаимным контролем; ложных срабатываний не было. После исключения этих измерений среднеквадратическая относительная ошибка предсказания незашумлённого отклика кажущегося УЭС уменьшилась с 6,50 до 1,40%, а среднеквадратическая ошибка $\ln(p)$ относительно заданной модели - с 0,366 до 0,259. Сопоставление разрезов приведено на рис. 3. В области ложного высокоомного объекта медианное УЭС снизилось с 837 до 297 Ом·м, приблизившись к фоновым 300

▼ Рис. 3. Электрические разрезы до и после исключения согласованно выявленных дефектов и индекс приоритета проверки объектов.





▲ Рис. 4. Трансформанты синтетического магнитного поля до и после контроля импульсных ошибок; рейтинг индикаторов для выделения границ заданной зоны.

Ом·м; индекс проверки А составил 0,80.

Немагнитная проводящая линза в результатах инверсии сохранилась и получила $A = 0,23$. Однако медианное восстановленное УЭС в её области составило 139 Ом·м вместо заданных 80 Ом·м.

Оба внесенных в магнитный профиль импульсных выброса были выявлены при сравнении исходных и повторных измерений. Замена ошибочных отсчетов повторными значениями уменьшила среднеквадратическую ошибку профиля относительно заданного поля с 6,00 до 0,99 нТл. Наибольший рейтинг получила вертикальная производная, $I = 0,85$; далее следуют THG - 0,75, Tilt - 0,52 и амплитуда аналитического сигнала - 0,48 (рис. 4). Средняя ошибка положения границ относительно заданной зоны составила 2,5 м для вертикальной производной и 5,0 м для THG. Этот порядок получен при принятой геометрии источника, высоте наблюдений и правилах выделения границ.

Дискуссия

Серия модельных разрезов использовалась для оценки качества классификации, а расчетный кейс - для проверки

влияния отбракованных измерений на результат инверсии. Методом случайного леса (Random forest) выявлено больше ошибок, чем обоими пороговыми способами, при этом доля ложных срабатываний оказалась ниже, чем у нормированного взаимного контроля. При сильном систематическом искажении группы измерений, связанных с одним электродом, применение ИИ не изменило состав исключённых данных. Возврат УЭС ложной высокоомной области к фоновому уровню показывает, насколько существенно эти отсчёты влияли на результат инверсии; тот же результат здесь обеспечил обычный взаимный контроль. Преимущество классификатора проявляется в случаях, когда дефект описывается сочетанием признаков и не выделяется одним порогом.

Дополнительно выявленные ошибки в значительной мере попадают в группу для просмотра: оценки двух способов контроля расходятся. Локальное отклонение может отражать и помеху, и реальную неоднородность. Поскольку признаки взаимности входят в набор признаков метода случайного леса (Random forest),

совпадение его решения с пороговым контролем нельзя считать независимым подтверждением ошибки. Поэтому окончательное решение об исключении данных должно учитывать результат повторной инверсии.

Более показателен результат для немагнитной проводящей линзы. В результатах инверсии она сохранилась, однако восстановленное УЭС в её области оказалось завышенным: наличие проводящей неоднородности воспроизводится увереннее, чем количественное значение её УЭС. Расхождение согласуется с ограниченной разрешающей способностью и сглаживанием модели; вклад этих причин отдельно не исследовался. Использование 139 Ом·м как точной петрофизической характеристики могло бы привести к неверному толкованию объекта даже после контроля данных. Поэтому наличие неоднородности, её геометрию и количественное значение УЭС следует оценивать отдельно. В том же расчётном сценарии уменьшилась ошибка предсказания известного незашумлённого отклика. На полевом материале такого эталона нет: малая невязка по оставшимся данным может сочетаться с неустойчивой моделью. Изменение регуляризации и начального приближения помогает выявить эту неустойчивость, но не заменяет оценку глубины исследования [13] и проверку размерности модели.

Магнитные данные позволяют уточнить положение границ зоны, отличающейся от окружающей среды по магнитной восприимчивости. Для немагнитной проводящей линзы такое уточнение невозможно, поскольку её магнитная восприимчивость принята равной фоновой. Отбраковка по отсутствию магнитной аномалии в этом случае означала бы потерю заданного геологического объекта. При этом рейтинг трансформант частично опирается на границы, выделенные по данным ЭТ. Поэтому совпадение границ, выделенных по магнитным данным и данным ЭТ, в этом рас-

чёте не является независимым подтверждением строения зоны. Рейтинг 0,85 для вертикальной производной относится только к принятой геометрии, намагничённости и уровню шума; при других условиях ранжирование необходимо повторить [8, 9].

Кроме того, тест охватывает ограниченное семейство моделей. Разделение по разрезам исключает смешение их шумовых реализаций, но не воспроизводит переход к новой геологической обстановке. Известный фон вне области инверсии повышает её точность. Трёхмерные объекты, ошибки координат и пространственно связанные полевые помехи требуют отдельного исследования. При этом тестирование проводилось на модели без учёта рельефа [4].

Для полноценной апробации подхода требуется архив исходных и взаимных измерений, геометрия установок и разметка причин отбраковки. Тестовые участки должны быть отделены от обучающих. Наряду с пропусками и ложными исключениями необходимо измерять время просмотра и частоту изменения результатов интерпретации после проверки. В данном теоретическом кейсе трудозатраты не оценивались, поэтому вывод о снижении затрат на обработку был бы преждевременным.

Выводы

На рассмотренном семействе синтетических разрезов метод случайного леса (Random forest) повысил полноту обнаружения дефектов ЭТ по сравнению с нормированным взаимным контролем с 77,4 до 91,3%. Преимущество классификатора проявилось прежде всего для дефектов, которые не выявлялись одним нормированным порогом взаимности. При сильном искажении группы измерений обычного взаимного контроля оказалось достаточно; в таком случае классификатор не дал дополнительного эффекта.

Связь контроля с повторной инверсией

позволяет оценивать последствия исключения данных для конкретных объектов разреза. В демонстрационном кейсе ложный высокоомный объект получил высокий приоритет проверки, а немагнитная проводящая линза сохранилась. Вместе с тем, неточное восстановление её УЭС показывает, что устранение дефектов наблюдений не устраняет неопределённость обратной задачи геофизики.

При внедрении такой обработки геофизик сможет сосредоточить проверку на измерениях, от которых зависит выделение конкретной неоднородности. Для этого результаты классификации должны рассматриваться вместе с повторной инверсией и магнитными признаками. Предстоит установить на независимых полевых участках, сокращает ли такой автоматизированный контроль ручной просмотр при сохранении геологически значимых данных.

Литература

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14-17.
2. Деев Е.В., Оленченко В.В., Дучков А.А., Заплавнова А.А., Сафронов О.В. Геоэлектрические образы активных разломов в районах развития многолетней мерзлоты (на примере высокогорных и арктических районов России) // Геология и геофизика. 2025. Т. 66, № 5. С. 654-668. DOI: 10.15372/GIG2024174.
3. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 712 с.
4. Казначеев П.А., Попов И.Ю., Модин И.Н., Жостков Р.А. Применение независимого конечноэлементного моделирования для оценки влияния простейших форм рельефа на результаты инверсии данных электротомографии (на примере рва треугольного сечения) // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98, № 1. С. 21-34. DOI: 10.21455/

std2019.1-2.

5. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 217-233. DOI: 10.31897/PMI.2022.23.

6. Blakely R.J. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 441 p. DOI: 10.1017/CBO9780511549816.

7. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

8. Cooper G.R.J., Cowan D.R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase // Computers & Geosciences. 2006. Vol. 32, no. 10. P. 1585-1591. DOI: 10.1016/j.cageo.2006.02.016.

9. Cooper G.R.J., Cowan D.R. A generalized derivative operator for potential field data // Geophysical Prospecting. 2011. Vol. 59, no. 1. P. 188-194. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2010.00901.x.

10. Dey A., Morrison H.F. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures // Geophysical Prospecting. 1979. Vol. 27, no. 1. P. 106-136. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1979.tb00961.x.

11. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. Vol. 44, no. 1. P. 131-152. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x.

12. Miller H.G., Singh V. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources // Journal of Applied Geophysics. 1994. Vol. 32, no. 2-3. P. 213-217. DOI: 10.1016/0926-9851(94)90022-1.

13. Oldenburg D.W., Li Y. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys // Geophysics. 1999. Vol. 64, no. 2. P. 403-416. DOI: 10.1190/1.1444545.