УДК 550.837.81

Ю.А.ДАВЫДЕНКО, *канд. техн. наук*, *ведущий инженер*, *davidenkoya@gmail.com*
Институт земной коры СО РАН, *Иркутск*
А.Ю.ДАВЫДЕНКО, *д-р физ.-мат. наук, профессор*, *davydenkoay@gmail.com*
GeliosGroup, *Иркутск*
И.С.КУПРИЯНОВ, *ведущий геофизик*, *child.of.north@googlemail.com*
П.А.ПОПКОВ, *начальник отдела геофизических исследований*, *popkovpa@alanab.ru*
С.В.СЛЕПЦОВ, *ведущий геофизик*, *sleptsovsv@alanab.ru*
ОАО «Алмазы Анабара», *Якутск*
И.Ю.ПЕСТЕРЕВ, *ведущий геофизик*, *ipipip@mail.ru*
С.В.ЯКОВЛЕВ, *старший геофизик*, *elmoniacos@gmail.com*
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», *Иркутск*

Y.A.DAVYDENKO, *PhD in eng. sc.*, *leading engineer*, *davidenkoya@gmail.com*, *Irkutsk*
Institute of the Earth's Crust Russian Academy of Sciences, *Siberian Branch*, *Irkutsk*
A.Y.DAVYDENKO, *Dr. in phys. & math.*, *professor*, *davydenkoay@gmail.com*
GeliosGroup, Irkutsk
I.S.KUPRIYANOV, *leading geophysicist*, *child.of.north@googlemail.com*
P.A.POPKOV, *head of geophysical research*, *popkovpa@alanab.ru*
S.V.SLEPTSOV, *leading geophysicist*, *sleptsovsv@alanab.ru*
OJSC Diamonds of Anabar, *Yakutsk*
I.Y.PESTEREV, *leading geophysicist*, *ipipip@mail.ru*
S.V.YAKOVLEV, *senior geophysicist*, *elmoniacos@gmail.com*
Siberian Geophysical Research-and-Development Company LLC, *Irkutsk*

ЭФФЕКТ ИНТЕГРАЦИИ РОБАСТНОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА С ИНВЕРСИЕЙ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТОДЕ СРЕДИННОГО ГРАДИЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТРУБОК ВЗРЫВА НА АНАБАРСКОМ ЩИТЕ

Для обнаружения кимберлитовых трубок взрыва на Анабарском щите были проведены полевые работы методом срединного градиента по методике ИНФАЗ-ВП. Использование оригинальных алгоритмов обработки в сочетании с методами робастной статистики позволило существенно повысить информативность полевого материала и выделить переходный процесс становления на включении прямоугольного токового импульса. С целью снятия зависимости кривых от расположения источник – приемник была применена процедура робастного регрессионного анализа. В результате рядом с эталонным объектом была оконтурена перекрытая терригенными отложениями трубка взрыва, которая ранее не выделялась на карте кажущегося удельного сопротивления. Впоследствии она была заверена бурением. В рамках одномерной пятислойной поляризующейся модели выполнена инверсия площадных данных, при этом наблюдается чувствительность до глубины 1200 м.

***Ключевые слова*:** робастный регрессионный анализ, вызванная поляризация, срединный градиент, переходные процессы.

THE EFFECT OF INTEGRATION ROBUST REGRESSION ANALYSIS WITH INVERSION OF TRANSIENTS FOR MEDIAN GRADIENT METHOD AT STUDY OF DIATREMES ON ANABAR SHIELD

For diatremes searching on Anabar crystalline shield classical scheme with measuring in both in frequency and time domain has been used. Using original algorithms in combination with robust statistical methods allow to significantly increase efficiency information quality of

the field material and detect transient during switch on current pulse. The robust regression procedure was used for removing curves dependence from transmitter-receiving setup. Sediments covered diatreme was discovered in the vicinity of etalon object. The diatreme, which was verified more recently by a borehole, was non manifested in the resistivity map. Inversion of areal data of transients was performed within five-layers one dimensional induced polarization model and sensitivity is observed up to 1200 m depth.

***Key words*:** robust regression analysis, induced polarization, median gradient, transient.

С целью обнаружения кимберлитовых трубок взрыва на Анабарском щите компания ОАО «Алмазы Анабара» проводит комплексные геофизические исследования. Электроразведочные работы проводились по методике ИНФАЗ-ВП, разработанной в компании «Северо-Запад». Использовалось два прибора ИМВП производства той же компании. В них предусмотрена возможность сохранения исходных данных в «wav»-формате. Измерения проводились установкой срединного градиента: одновременно четырьмя каналами регистрировались временные ряды разностей потенциалов приемных электродов MN в пределах генераторного диполя AB. Разрез возбуждался последовательностью разнополярных импульсов без токовой паузы. Сила тока составляла 0,5 А, частота источника 4,88 Гц, что при шаге дискретизации измерительного модуля в 0,4 мс во время прямоугольного импульса длительностью 0,1024 с позволяет записывать кривую становления в 256 отчетов аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Шаг по профилю в 40 м соответствовал длине MN; расстояние между профилями 50 м. Всего на данном участке записано около 1000 точек наблюдений. В результате для каждой MN в штатно-поставляемой программе «Octopus Pro» рассчитаны: кажущееся удельное сопротивление ρ_k; с использованием относительного фазового параметра $\Delta\varphi_k^0$ кажущаяся поляризуемость η_k по формуле $\eta_k = -2{,}5\Delta\varphi_k^0$. Данные параметры, особенно η_k, сохраняют зависимость от положения источник – приемник, поскольку коэффициент установки, рассчитанный для однородного полупространства, полностью эту зависимость не компенсирует, а при расчете η_k и этот коэффициент не используется.

Проведение инверсии данных электромагнитных зондирований позволяет перейти от кажущихся характеристик к геоэлектрическому разрезу, свободному от упомянутой выше зависимости, однако для устойчивого решения обратной задачи недостаточно входных данных. В связи с этим было принято решение переобработать полевой материал в специально для этого адаптированном программно-измерительном комплексе дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ). Из первичных данных, содержащих для каждой точки записи непрерывную запись последовательности разнополярных импульсов, с использованием методов робастной статистики были рассчитаны усредненные переходные процессы и их временные производные на 16 задержках, нормированные на установившиеся значения DU_0, полученные при усреднении 1/8 интервала токового импульса, взятого перед его выключением.

При переобработке использовался оригинальный алгоритм подавления тренда, позволяющий с высокой точностью получать отсчеты на временных задержках в условиях высокой теллурической активности и дрейфа нуля на приемных электродах при наличии выбросов и сбоев. Этот подход, в сочетании с широким применением методов робастной статистики, позволил существенно повысить стабильность результатов обработки [2]. Невязка уточненных значений DU_0 со значениями, полученными из программы «Octopus Pro», достигает 1,5 %, что объясняется более корректным подавлением тренда. Нормированные переходные процессы обозначим DU, а их временные производные – DtDU, в фоновой области и над трубкой взрыва эти кривые существенно различаются (рис.1). Точность расчетов достаточно высокая, коэффициент вариации и

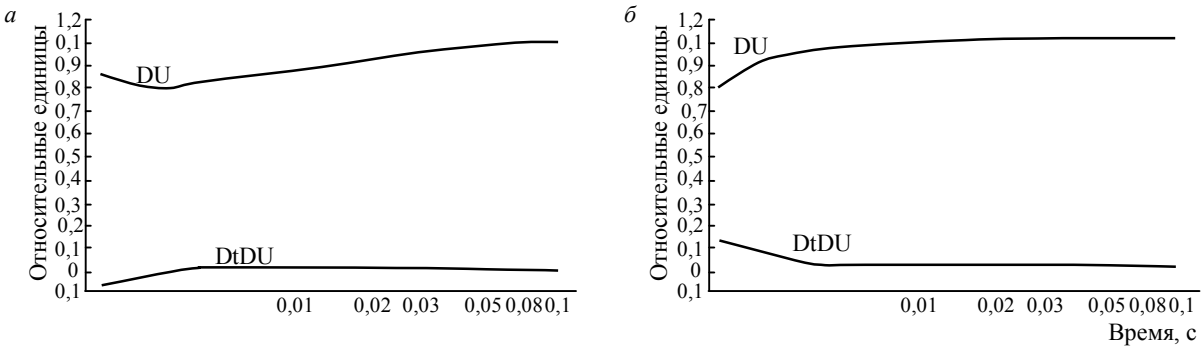


Рис.1. Нормированные переходные процессы DU и их временные производные DtDU в фоновой области (*а*) и над трубкой взрыва (*б*)

отношение стандартного отклонения к амплитуде сигнала практически для всего временного интервала редко превышает 0,1 %. Существенное отличие кривых вызвано, прежде всего, изменением проводимости, что привело к росту индукционной составляющей, имеющей обратный знак с эффектом ВП.

Несколько угловатый вид кривых на ранней стадии объясняется низкой частотой дискретизации (2,5 кГц). Это означает, что в полосу пропускания попадают частоты немногим более 1 кГц (согласно теореме Найквиста). Кроме того, отсутствие привязки (аппаратной синхронизации) к фронту выключения существенно затрудняет вычисление переходных характеристик.

Посредством применения к обработанной кривой быстрого преобразования Фурье (БПФ) были рассчитаны относительные фазовые характеристики для 1-й и 3-й гармоник, 3-й и 5-й гармоник, которые имели высокую корреляцию с расчетами штатной программы «Octopus Pro». Анализ этих данных показал, что относительная фазовая характеристика – это некая обобщенная трансформанта, характеризующая форму кривой, и ее информативность сопоставима с временной производной на поздних временных задержках. Использование относительных фазовых характеристик не позволяет делать уверенные выводы о вкладах индукционных процессов и процессов вызванной поляризации (ВП) в наблюденном поле. По этим характеристикам нельзя делать выводы о глубине залегания объектов с использованием скин-эффекта. В то же время такие оценки вполне возможно производить, анализируя переходные процессы и их временные характеристики.

С целью качественного анализа полевого материала необходимо минимизировать зависимость нормированных кривых DU и DtDU от положения измерительной линии и питающего диполя. Решение этой задачи аналогично приему, который применяется в гравиметрии для снятия региональной составляющей гравиметрического поля и выделения локальных аномалий. При обработке полевых кривых зондирований использовался оригинальный алгоритм робастной инверсии, разработанный на основе опубликованных работ [3, 4]. За счет итеративного подхода в этом алгоритме в исходных данных минимизируется влияние факторов, называемых регрессорами. В нашем случае в качестве регрессоров использовались аналитические функции зависимости регрессоров от положения питающего диполя AB и приемных электродов MN и результаты расчета прямой задачи на каждой точке зондирования от фонового многослойного разреза. Робастность позволяет избежать появления смещенных оценок, возникающих под влиянием аномальных значений наблюденного поля, надежно увязать тренд в исходных данных с зависимостями, описываемыми регрессорами.

В результате применения алгоритма робастной регрессии на каждой временной задержке построены карты и псевдоразрезы, в которых снято влияние геометрического фактора источник – приемник. По эти картам и разрезам можно судить о наличии трехмерных объектов и их положении в разрезе с учетом скин-эффекта. Свойства же этих объектов определяются посредством инверсии в рамках модели среды с частотной дисперсией электропроводности.

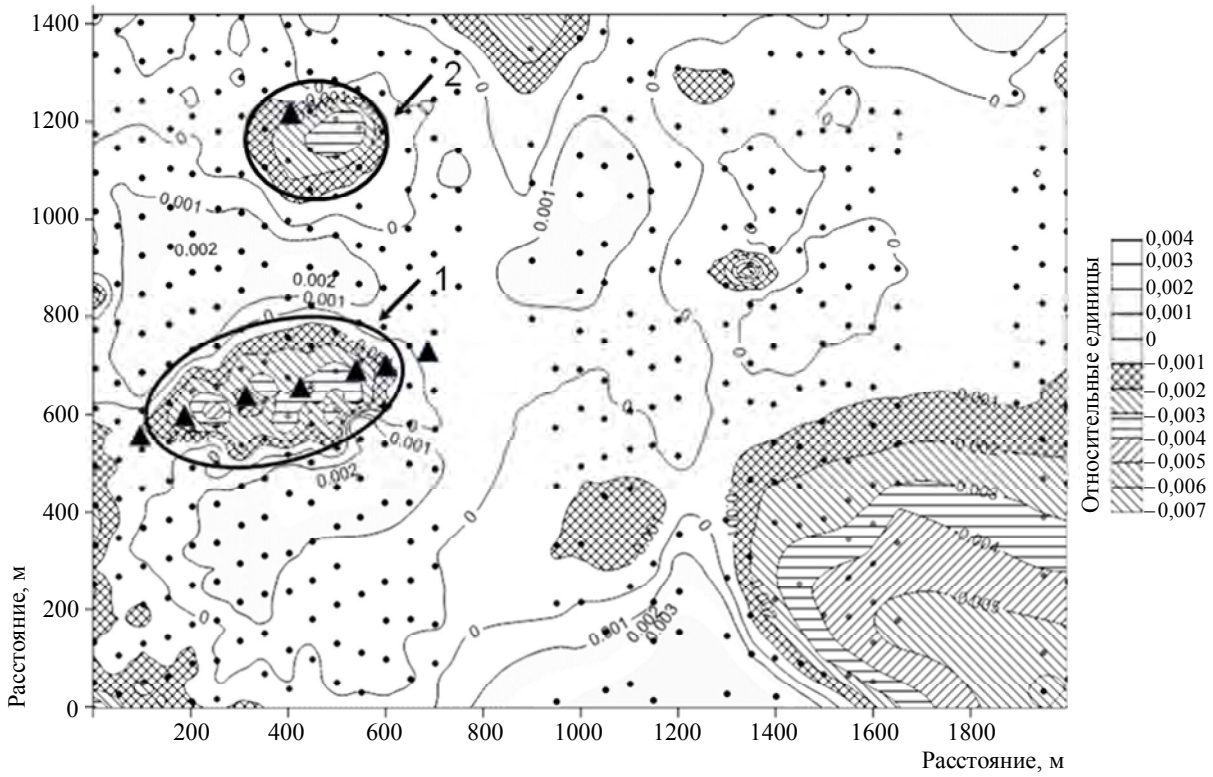


Рис.2. Схема распределения временной производной переходного процесса DtDU на поздней временной задержке в 70 мс после снятия влияния геометрии системы измерений посредством применения робастного регрессионного анализа с контурами объектов, выделенных в магнитном поле после исключения интенсивных магнитных аномалий и эффекта рельефа в программе GelioSMI на участке электроразведочных работ.
Треугольниками показаны скважины, подтвердившие существование трубок взрыва – объектов 1 и 2

На основании анализа наблюденных кривых с применением робастного регрессионного анализа, а также по результатам инверсии в рамках одномерной модели было выделено два объекта. Эти объекты заверены бурением; при этом о наличии второго объекта нам не было известно до тех пор, пока по результатам переобработки не был сделан уверенный прогноз о наличии трубки взрыва. Особенно хорошо эти объекты выделяются на поздних временных задержках. На рис.2 приведена карта 15-й временной задержки после подавления влияния геометрии установки. Объекты хорошо совпадают с контурами аномалий, выделенных в магнитном поле после исключения интенсивных аномалий и эффекта рельефа в программе GelioSMI [1]. Следует отметить, что небольшая трубка взрыва (объект 2), перекрытая обледенелыми терригенными отложениями, не выделялась по карте кажущегося удельного сопротивления из-за наличия высокоомного экрана.

Ниже приведены результаты применения одномерной инверсии, когда для каждой точки зондирования рассчитывался сигнал от горизонтально-слоистого полупространства, а параметры слоев задавались с учетом частотной дисперсии электропроводности по формуле Cole-Cole. Таким образом, выполнено математическое моделирование полевых кривых DU и DtDU с целью получения слоистого геоэлектрического разреза по профилям. В результате модельных расчетов с учетом частотной дисперсии электропроводности были определены численные значения параметров поляризуемости разреза для каждого из слоев по всем точкам наблюдений. Всего было выделено пять слоев до глубины 1200 м. Для обработки и интерпретации полевых данных использовался программный комплекс, написанный в соавторстве с А.В.Каминским, включающий прямую и обратную задачу геоэлектрики для заземленной линии. Временной диапазон, используемый при моделировании, определялся достоверностью

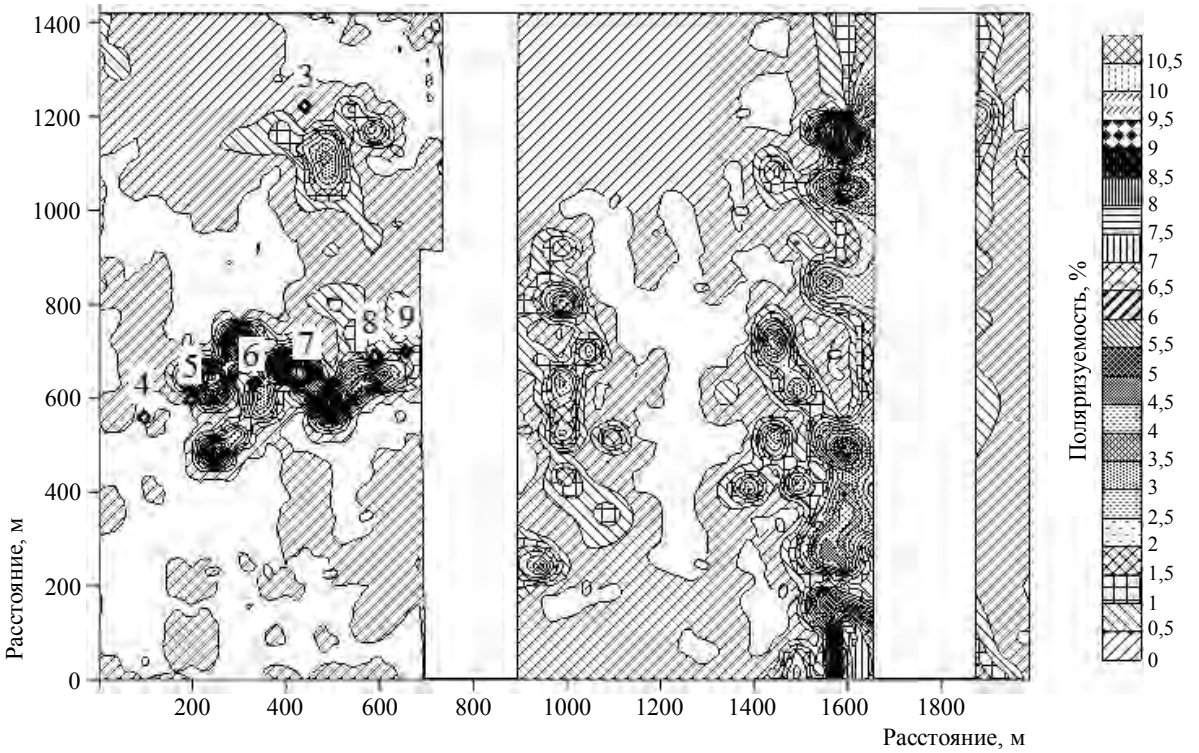


Рис.3. Карта поляризуемости 1-го слоя (0-100 м) геоэлектрической модели. Номерами отмечены пробуренные скважины. Прямоугольниками закрыты области с недостоверными данными полевой съемки

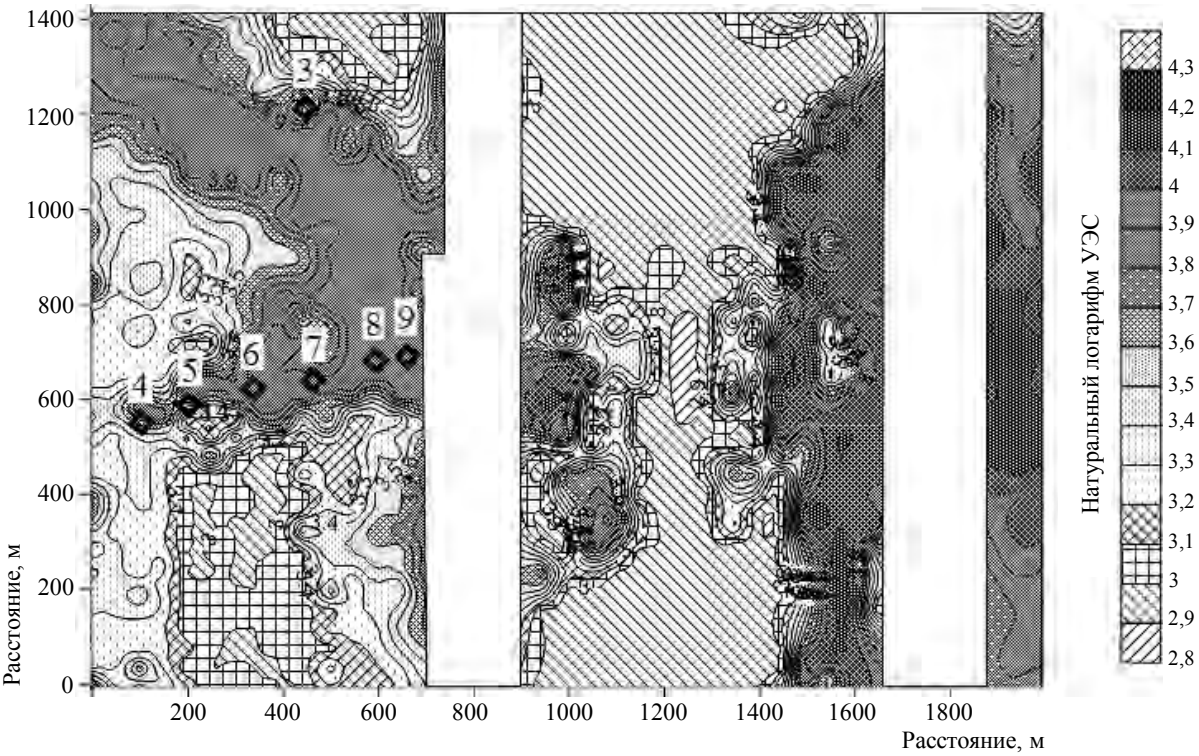


Рис.4. Карта распределения значений натурального логарифма УЭС в пределах 2-го геоэлектрического слоя

входных данных, т.е. точностью измерений каждого из параметров в каждой точке измерения. В качестве функции невязки, значение которой минимизируется в результате инверсии, использовалось среднеквадратическое отклонение. Результатом являются карты и разрезы распределения удельного электрического сопротивления и поляризуемости.

При подборе в рамках одномерной модели раскреплялась поляризуемость только 1-го и 3-го слоев. Коэффициент множественной корреляции между этими слоями достаточно низкий – 0,3. В районе трубок взрыва (объекты 1 и 2) поляризуемость увеличивается (2-6 %).

Поляризуемость эталонной трубки (объект 1) распределена неравномерно – наблюдается значительный рост в северо-восточной части в 1-м слое (рис.3) и кольцевой эффект с аномалиями посередине в 3-м слое.

Наиболее достоверные данные по проводимости получены для 2-го геоэлектрического слоя мощностью 350 м с подошвой на глубине в 450 м, так как аппаратные погрешности для соответствующих ему времен переходного процесса на результат инверсии сказываются слабо. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) второго слоя ρ_2 соответствует УЭС от известняков (доломитов) карбонатной толщи. Зональность распределения УЭС, ориентированная вдоль силового кабеля, выражена во 2-м слое значительно слабее, чем в 1-м. Через объекты 1 и 2 проходит подковообразная зона пониженного сопротивления, связанная, видимо, с повышенной трещиноватостью в ослабленных разломных зонах, к которым приурочены трубки взрыва (рис.4). Возможно, здесь существуют две разломные зоны, юго-западного и северо-восточного направления, которые пересекаются под углом 30-35° в центре площади.

Комплексный анализ позволяет делать надежные геологические прогнозы, поскольку включает в себя сопоставление локальных аномалий, выявленных после снятия влияния геометрии системы измерений посредством применения робастной регрессии, с результатами инверсии электромагнитных зондирований, проведенной с учетом частной дисперсии электропроводности и данными детальной съемки магнитного поля. Высокая плотность данных электромагнитных зондирований в методе срединного градиента позволяет выполнять их трехмерную инверсию, для этого необходимо усовершенствовать методику проведения полевых работ и обработку данных. Тогда возможно с высокой степенью надежности выделять объекты поиска и определять их геоэлектрические характеристики. С этой целью принято решение разработать аппаратно-программный электроразведочный комплекс МАРС с использованием опыта, полученного при создании программно-измерительного комплекса ДНМЭ, и применять программные комплексы трехмерного моделирования для нестационарных электромагнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Давыденко А.Ю.* Выделение аномалий и составляющих гравимагнитных полей в условиях интенсивных помех // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. 2009.

2. *Давыденко Ю.А.* Разработка программно-измерительного комплекса для дифференциально-нормированного метода электроразведки: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2005.

3. *Mia Hubert*. Rousseeuw and Stefan Van Aelst, High-Breakdown Robust Multivariate Methods / Mia Hubert, J.Peter // Statistical Science. 2008. V.23. N.1.

4. *Mia Hubert*. Rousseeuw; ROBPCA: A New Approach to Robust Principal Component Analysis / Mia Hubert, Karlien Vanden Branden and J.Peter // Technometrics, February. 2005. V.47. N.1.

REFERENCE

1. *Davydenko A.Y.* Anomalies and features recognition in the gravitational and magnetic noisy fields. Geodynamics. Depth structure. Thermal fields of the Earth. Gephysical fields interpretation. Yekaterinburg: RAS, 2009.

2. *Davydenko Y.A.* The development of software meagerement system for differentially normalized method of electromagnetic sounding: Research Paper … PhD in eng. sc. 2005.

3. *Mia Hubert, Peter J.* Rousseeuw and Stefan Van Aelst, High-Breakdown Robust Multivariate Methods // Statistical Science. 2008. V.23. N.1.

4. *Mia Hubert, Karlien Vanden Branden and Peter J.* Rousseeuw; ROBPCA: A New Approach to Robust Principal Component Analysis // Technometrics, February 2005. V.47. N.1.