

УДК 550.837.6
ББК 26.21 31.22

АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Павлов Б. В.¹, Волковицкий А. К.²

(ФГБУН Институт проблем управления РАН, Москва)

Приведено краткое описание принципа функционирования аэроэлектроразведочных комплексов и задач, решаемых с их применением. Основное внимание уделено вопросам техники и методики измерений для низкочастотных активных индуктивных зондирующих систем и технологии их использования. Приведены принципы оценки измерительной, картографической и производственной эффективности аэроэлектроразведочных комплексов, определены основные пути их повышения.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, электромагнитная зондирующая система, аэрогеофизический комплекс.

1. Введение

Среди многих направлений хозяйственной деятельности едва ли не важнейшим является эффективное освоение богатств земных недр, разведка и разработка полезных ископаемых. Важное место занимает и создание высокоэффективных методов изучения геологического строения территорий, оценки перспективности поисков полезных ископаемых. В условиях бурного развития промышленных технологий рас-

¹ Борис Викторович Павлов, доктор технических наук, старший научный сотрудник (pavlov@ipi.ru).

² Андрей Кириллович Волковицкий, кандидат технических наук (avolkovitsky@yandex.ru) (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-75-80).

тет потребность в поисках месторождений новых видов минерального сырья в не освоенных ранее районах. Особую значимость приобретают геофизические методы и технологии, являющиеся важной составляющей геологоразведочного процесса благодаря высокой эффективности, надежности, дешевизне и оперативности.

В арсенале геофизических методов одними из наиболее перспективных являются методы индуктивной электроразведки – зондирование земных недр низкочастотным переменным магнитным полем, из которых наиболее мощными при масштабных региональных исследованиях и работах в труднодоступных районах следует считать аэроэлектроразведочные, при которых зондирующая установка размещается на борту летательного аппарата-носителя. Аэроэлектроразведочные технологии позволяют в темпе движения летательного аппарата покрыть сетью измерений значительную территорию, исключая при этом необходимость выполнения сложных и трудоемких наземных полевых работ в труднодоступных районах.

2. Общие принципы аэроэлектроразведочных измерений

В основе функционирования аэроэлектроразведочных систем лежит единый принцип возбуждения индуктивно наведенных вихревых токов в проводящих толщах зондируемой среды с последующим измерением магнитного поля, вызываемого этими наведенными токами. Рис. 1 весьма схематично иллюстрирует этот процесс.

Источником зондирующего поля принято считать точечный магнитный диполь с переменным во времени магнитным моментом. Таким источником в первом приближении является многовитковая плоская катушка индуктивности, питаемая переменным током. Значение вектора магнитного момента такого источника

$$(1) \quad M(t) = \mathbf{n}NSI(t).$$

Здесь S – площадь петли; N – количество витков; $I(t)$ – ток в катушке; \mathbf{n} – единичный вектор нормали к плоскости катушки.

Направление и амплитуда вектора напряженности магнитного поля, возбуждаемого точечным индуктивным излучателем в произвольной точке пространства, не совпадающей с точкой его расположения, определяется пространственным положением точки наблюдения относительно излучателя, а изменение амплитуды вектора во времени в квазистационарном приближении совпадает с формой тока в петлевом излучателе

$$(2) \quad H(t) = G(x_R, \tilde{x}_T) m(t),$$

где $G(x_R, \tilde{x}_T)$ – действительный трехмерный вектор, зависящий от пространственного положения точки измерения поля x_R , пространственного положения и ориентации источника поля \tilde{x}_T ; $m(t) = (\mathbf{n}, M(t)) = NSI(t)$.

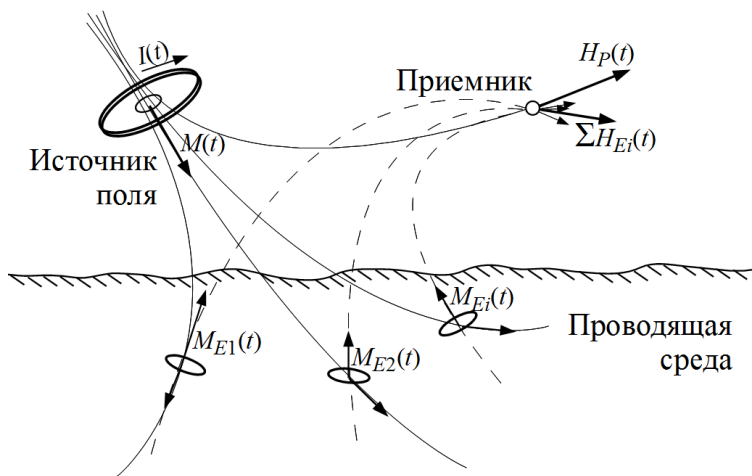


Рис. 1. Аэроэлектроразведочные измерения

Результатом взаимодействия переменного магнитного поля с проводящей средой является возникновение в ней наведенных вихревых токов, а также других электромагнитных явлений. Структура этих процессов весьма сложным образом связана с физическими свойствами проводящей среды [1], однако в упрощенном приближении неполяризуемой немагнитной проводящей среды может быть представлена композицией,

составленной из различных плоских замкнутых витков [8]. Отклик каждого такого витка на возбуждающее поле описывается классической сверткой «вход–выход» линейной пассивной LCR-структуры. Магнитный момент i -го вторичного источника будет:

$$(3) \quad M_{Ei}(t) = G_{1i}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_T) \int_0^{\infty} h_{Zi}(\tau) m(t - \tau) d\tau.$$

Здесь $G_{1i}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_T)$ – амплитудный коэффициент связи, действительный трехмерный вектор; \tilde{x}_i – вектор, определяющий пространственное положение и угловую ориентацию вектора дипольного момента i -го вторичного источника композиции; $h_{Zi}(\tau)$ – его импульсная характеристика.

Изменяющаяся во времени напряженность магнитного поля, возбуждаемого каждым вторичным источником, наблюдаемая в точке расположения приемника-измерителя, описывается выражением

$$(4) \quad H_{Ei}(t) = G_{2i}(\tilde{x}_i, x_R) M_{Ei}(t).$$

Здесь $G_{2i}(\tilde{x}_i, x_R)$ – действительная матрица 3×3 , зависящая от пространственного расположения и ориентации i -го векторного источника вторичного поля наведенных токов – \tilde{x}_i и положения точки наблюдения x_R .

Наряду с влиянием поля наведенных токов чувствительный приемник непосредственно воспринимает и первичное возбуждающее поле. Его напряженность в точке измерения будет

$$(5) \quad H(t) = G(x_R, x_T) M(t).$$

Здесь G_3 – действительнoзначная матрица 3×3 , которая определяется взаимным положением излучателя и приемника. Суммарное поле, являющееся суперпозицией полей (4) и (5) и регистрируемое приемником в точке измерения, определяется выражением

$$(6) \quad H_{\Sigma}(t) = \sum_i \left\{ G_{2i}(\tilde{x}_i, x_R) G_{1i}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_T) \int_0^{\infty} h_{Zi}(\tau) m(t - \tau) d\tau \right\} + G_3(x_R, x_T) M(t).$$

Выражение (6) может быть представлено в виде

$$(7) \quad H_{\Sigma}(t) = \int_0^{\infty} h_Z^{\Sigma}(\tau) m(t - \tau) d\tau + G_3(x_R, x_T) M(t),$$

где

$$h_Z^{\Sigma}(x_R, x_T, \tau) = \sum_i \{G_{2i}(\tilde{x}_i, x_R) G_{1i}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_T) h_{Zi}(\tau)\}$$

– векторное трехмерное значение совокупной кажущейся импульсной характеристики композиции всех вторичных источников с учетом условий наблюдения – пространственного положения и ориентации источника поля \tilde{x}_T , положения точки наблюдения x_R .

Важно заметить, что в соответствии с выражением (7) вследствие того, что компоненты вектора h_Z^{Σ} в общем случае по-разному зависят от времени, направление вектора поля в точке наблюдения может изменяться даже при неизменных условиях измерения, постоянстве и неподвижности зондируемой среды \tilde{x}_i .

К обеим частям равенства (7) можно применить преобразование Лапласа. Его результатом будет спектральное (частотное) представление процесса:

$$(8) \quad H_{\Sigma}(j\omega) = \left[W_Z^{\Sigma}(x_R, \tilde{x}_T, j\omega) \right] m(j\omega) + G_3(x_R, x_T) M(j\omega).$$

Здесь $H_{\Sigma}(j\omega)$ – частотный спектр наблюдаемого поля; $W_Z^{\Sigma}(x_R, \tilde{x}_T, j\omega)$ – трехмерный комплексный вектор, коэффициент связи между источником поля и приемником в условиях влияния зондируемой среды; $M(j\omega)$, $m(j\omega)$ – частотные спектры вектора магнитного момента возбуждающего источника и его модуля.

Формулы (7) и (8) отражают классическое геофизическое представление о процессе зондирования с помощью индуктивной активной аэроэлектроразведочной установки с контролируемым точечным источником поля. Задачей зондирования является определение по данным измерений параметров, которые зависят от свойств зондируемой среды и не зависят от условий измерения [10]. В свете этого важно количественно определить и отделить в получаемых результатах влияние условий измере-

ния (x_R и \tilde{x}_T) от параметров, обусловленных свойствами среды $W_Z^\Sigma(x_R, \tilde{x}_T, j\omega)$.

Стоит заметить, что значение матрицы $G_3(x_R, x_T)$ при известных значениях x_R и x_T может быть вычислено вполне строго, исходя из формулы для поля точечного диполя в квазистационарном приближении. Согласно [2] напряженность поля точечного источника в произвольной точке пространства, не совпадающей с точкой расположения источника, определяется выражением

$$(9) \quad H(r) = \frac{1}{4\pi} \frac{3(M, r)r - (r, r)M}{|r|^5}.$$

Здесь r – радиус-вектор точки наблюдения поля в системе координат с началом в точке расположения источника; M и H – векторы магнитного момента источника и напряженности поля в точке наблюдения в той же системе координат. Непосредственно пользуясь этой формулой и задавшись геометрическими параметрами установки можно вычислить значение матрицы G_3 .

Корректное определение значений геометрических параметров вторичных источников G_{2i} и G_{1i} является существенно более сложной некорректной задачей, поскольку необходим учет всех особенностей взаимодействия зондирующего поля со средой. Однако для оценки приближенного значения вектора поля отклика с успехом может быть применена, хотя и несколько упрощенная, но вполне адекватная схема, получившая название «метод отраженного диполя» [7]. Идеализация заключается в том, что моделью зондируемой среды полагается идеальное проводящее полупространство. При таком подходе с точки зрения приемника источник поля как бы «отражается» в проводящем полупространстве (рис. 2).

Задавшись величиной и направлением вектора магнитного момента передающей системы, геометрическими параметрами установки и ее положением над поверхностью зондируемой среды, напряженность поля в точке расположения приемника можно приближенно вычислить как результат сложения полей

двух источников – основного зондирующего $M_P(t)$ и виртуального «отраженного» в зеркале проводящей среды $M_R(t)$.

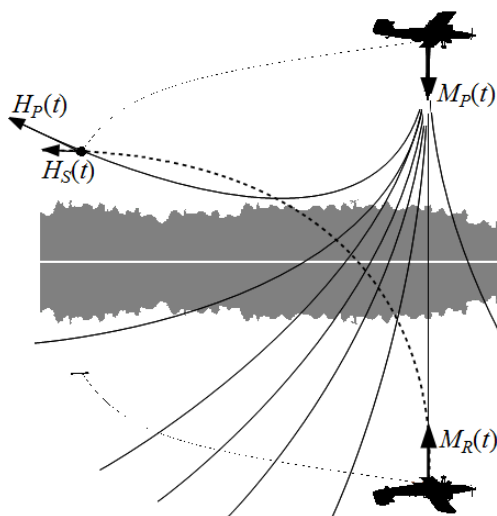


Рис. 2. Метод отраженного диполя

В рамках этого упрощенного подхода характер взаимодействия поля со средой описывается скалярным значением формы эквивалентной импульсной или частотной характеристики, а амплитуда и направление вектора, определяемое влиянием совокупности факторов G_{2i} и G_{1i} , – по методу отраженного диполя. Такая модель, безусловно, является упрощенной. Однако, пользуясь ею, можно с достаточной детальностью объяснить принципы функционирования многочисленных аэроэлектроразведочных систем, особенности и сложности их технической реализации, а также количественно оценить соотношения значений измеряемых величин физических полей и сигналов.

3. Геофизически значимая информация в аэроэлектроразведочных измерительных системах

Поскольку основным назначением аэроэлектроразведочных систем является исследование физических свойств зондируемой

среды, основной задачей обработки результатов измерений является выделение из общей совокупности измеренных сигналов геофизически обусловленной информации, зависящей только от электромагнитных свойств объектов зондирования и не зависящей от разного рода искажающих факторов. В соответствии с формулами (7) и (8) геофизически значимой информацией является форма наблюдаемой при известных условиях измерения $h_z^z(\tau)$ – импульсной и $W_z^z(j\omega)$ – частотной характеристик зондируемой среды.

Обнаружительные возможности различных аэроэлектро-разведочных систем существенно различаются в зависимости от класса поисковых задач. Сегодня их спектр очень широк: геофизическое картирование мощности рыхлых отложений, поиск месторождений руд и кимберлитов, поиск подземных вод, решение инженерных и гидрогеологических задач, батиметрия на пресных и соленых акваториях.

С учетом этого, вне зависимости от технического устройства той или иной системы, важно, насколько значима в геофизическом отношении получаемая информация. Поскольку свойства зондируемой среды в результатах измерений предстают в виде формы частотной или импульсной характеристик разреза, важной характеристикой любой аэроэлектроразведочной системы является частотный диапазон измерений и структура частотного спектра зондирующего поля.

Форма и изменение во времени вторичных наведенных токов в зондируемой среде определяется, главным образом, параметрами ее удельной электропроводности. Простым примером спектра поля отклика зондируемого объекта является зависимость от значения зондирующей частоты вихревого тока, наводимого в одиночном проводящем витке, обладающем индуктивностью L и сопротивлением R . Пусть виток расположен в однородном монохромном переменном магнитном поле частоты ω . $H(t) = H_0 \cos \omega t$ ($H_0(\omega)$ в спектральной комплексной записи). Пусть также силовые линии поля перпендикулярны плоскости витка.

Наведенный ток в витке будет

$$(10) I(\omega) = \mu_0 \frac{j\omega SH_0(\omega)}{R + j\omega L} = \mu_0 \frac{SH_0(\omega)(j\omega + \omega^2\tau)}{(1 + \omega^2\tau^2)R}.$$

Здесь $\tau = L/R$ – постоянная времени витка, S – его площадь, μ_0 – масштабный коэффициент системы СИ (магнитная проницаемость вакуума).

Частотная характеристика такого индуктивно-резистивного витка в виде зависимости действительной и мнимой компонент наведенного в нем тока от частоты при фиксированном значении параметров L и R представлена на рис. 3.

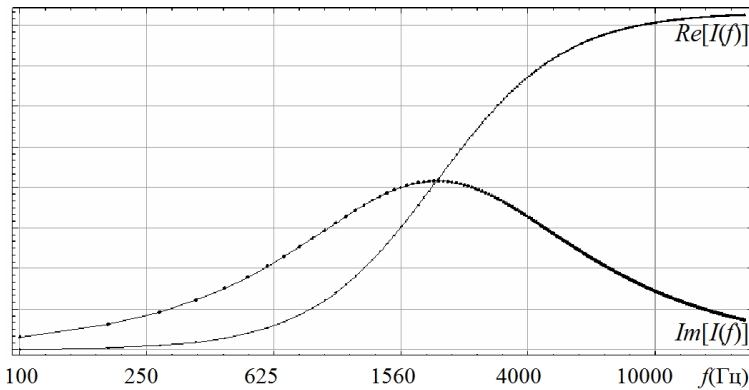


Рис. 3. Частотная характеристика LR-витка.

Определение истинной структуры наведенных токов, как упоминалось выше, является сложной вычислительной задачей. Ее решение даже для простой модели зондируемой среды, как правило, неоднозначно и может быть получено лишь сложными итерационными методами, однако для некоторых типовых объектов значение параметра τ поддается простому расчету [8]. Например, для проводящей сферы с радиусом a и удельной электропроводностью σ

$$\tau = \frac{\sigma\mu_0 a^2}{\pi^2},$$

а для бесконечной ленты толщиной h и шириной $2a$

$$\tau = \frac{\sigma h \mu_0 a}{4}$$

при $h \ll a$ (μ_0 – магнитная постоянная).

В данном контексте принципиально, что в широком диапазоне свойств проводящей среды в целом сохраняется общий характер кривых (рис. 3).

Очевидно, что наибольшей информативностью применительно к исследованию изменчивости проводящих свойств зондируемой среды обладает средняя часть частотного диапазона, где наиболее детально выявляется зависимость обеих – и действительной, и мнимой компонент от частоты зондирования. На рисунке хорошо видно, что при высоких частотах характер взаимодействия поля со средой вырождается, переходя в идеальное отражение, описываемое методом отраженного диполя, и практически не связан со свойствами среды.

Применительно к аэроэлектроразведочным методам исследований, процесс зондирования хорошо описывает модель диффузии поля в проводящей среде [9]. В рамках этой модели глубина проникновения поля зависит от частоты зондирования и определяется как значение скин-глубины

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}.$$

Таким образом, применение существенно низких частот зондирования позволяет исследовать более глубинное строение геологической среды. Изучение возможного диапазона изменчивости физических свойств горных пород [3], а также опыт практического использования аэроэлектроразведочных систем показывают, что наибольший интерес для решения геофизических задач представляют частоты в диапазоне 10 Гц–50 кГц. Для обеспечения чувствительности зондирующей системы к геоэлектрическому разрезу в выбранном диапазоне частот необходимо обеспечить в спектре источника поля $M(\omega)$ наличие необходимых значимых составляющих.

Частотная и импульсная характеристики геоэлектрического разреза однозначно связаны между собой, однако методы интерпретации геофизически значимой информации в частотном и

временном представлении существенно отличаются. В этой связи следует обратить внимание на эффективность анализа формы переходной характеристики при поисках локальных проводящих объектов.

Пусть в зоне действия поля зондирующей системы располагаются два объекта в виде замкнутых колец, имеющих разные значения постоянной времени. Пусть хорошо проводящее LR-кольцо, имеющее большое значение постоянной времени (τ_1), располагается на значительной глубине, дальше от измерительной установки, а плохо проводящее, имеющее малое значение постоянной времени (τ_2) – ближе. Отклик от каждого из этих вторичных источников, регистрируемый в точке приема, будет определяться изменением во времени зондирующего поля и геометрическими параметрами, влияние которых выражается значениями $D_1 = G_{21}G_{11}$ для первого и $D_2 = G_{22}G_{12}$ – для второго (6). Влияние отклика от близкого объекта в целом больше, чем от дальнего, поскольку $|D_1| \ll |D_2|$, однако его характер поразному проявляется при зондировании полем, изменение которого во времени представляет собой единичный скачок вида

$$M(t) = \begin{cases} M_0 : t < 0, \\ 0 : t \geq 0. \end{cases}$$

В этом случае регистрируемое приемником поле вихревых токов от каждого из двух вторичных источников описывается выражением

$$(11) H_i(t) = \exp(-t / \tau_i) D_i M_0, \quad t > 0, \quad i = 1, 2.$$

Изменение во времени соотношения величин амплитуд поля отклика от поверхностного и глубокого объектов составит

$$(12) r(t) = \frac{|H_2(t)|}{|H_1(t)|} = \frac{|D_2 M_0|}{|D_1 M_0|} \exp \left[-t \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1 \tau_2} \right].$$

Эту величину можно считать степенью маскирующего влияния поверхностного объекта. Непосредственно после выключения поля, когда $t \ll \tau_2 \ll \tau_1$, значение $r(t)$ определяется исключительно соотношением геометрических факторов. С течением времени значение $r(t)$ экспоненциально убывает,

влияние поверхностного объекта с течением времени как бы «растворяется» [8].

Благодаря простоте приведенного принципа поиска локальных проводящих объектов анализ геофизически значимой информации в форме переходной характеристики является доминирующим в рудной геофизике. Он особенно эффективен при поисках мощных хорошо проводящих рудных тел в изолирующих вмещающих породах под слоем слабо проводящих поверхностных отложений. Применительно к этой задаче информацию о геоэлектрическом строении слабо проводящих поверхностных объектов можно с уверенностью считать второстепенной, электромагнитное влияние поверхностных отложений применительно к поиску проводящих руд принято называть геологической помехой [10]. Величина $r(t)$, таким образом, является степенью влияния геологической помехи на разных временах регистрации.

С другой стороны, при исследованиях слабопроводящих приповерхностных элементов строения геоэлектрического разреза с успехом применяются методы интерпретации, в основе которых лежит частотное представление геофизически значимой информации электромагнитного зондирования [5]. Таким образом, выбор формы представления выбирается исходя из особенностей решаемых геологических задач и условий геологического строения. Возможность использования при интерпретации обеих форм представления значительно расширяет возможности интерпретации результатов электромагнитного зондирования.

4. Классификация аэроэлектроразведочных измерительных систем

По форме представления геофизически значимой информации аэроэлектроразведочные измерительные системы принято делить на частотные, для которых формой представления является частотная характеристика (или ее фрагмент), и временные, для которых формой представления является импульсная характеристика (или ее фрагмент) [12].

Исторически частотные системы появились раньше. Возбуждающее поле их передатчиков имело характер непрерывного (часто даже монохроматического) гармонического сигнала. Даже сегодня частотные системы иногда называют системами с непрерывным возбуждением. По мере технического совершенствования новых видов аппаратуры число составляющих в спектре зондирующего сигнала существенно увеличивалось. Форма зондирующего сигнала во времени становилась более сложной, а в некоторых даже является импульсной. Здесь важно заметить, что определяющей характеристикой принадлежности системы к классу частотных или временных является форма представления геофизически значимой информации, но не форма зондирующего сигнала.

Поскольку частотная и импульсная характеристики связаны между собой прямым и обратным преобразованием Лапласа, а также учитывая, что любой периодический сигнал может быть представлен конечной или бесконечной суммой гармонических компонент, для каждой из которых возможно измерение значения частотной характеристики, существует класс гибридных систем с двойной формой представления геофизически значимой информации – как в виде импульсной, так и в виде частотной характеристик. Следует заметить, что класс этот крайне немногочислен ввиду сложности реализации систем на этом принципе.

Аэроэлектроразведочные измерительные системы и геофизические методы принято также классифицировать по способу исключения из результатов измерений непосредственного влияния первичного зондирующего поля. Главной сложностью решения этой задачи является значительная амплитуда первичного поля, обычно многократно превышающая амплитуду поля отклика, а также сильная зависимость первичного поля от изменений геометрических параметров измерительной установки. Это влияние получило даже специальное название – «геометрический шум». Для преодоления влияния геометрического шума традиционными являются следующие способы:

- Неполное извлечение геофизически значимой информации, наблюдение только той части в сигналах отклика, ко-

торая, с одной стороны, зависит от свойств геоэлектрического разреза, а с другой – не зависит от величины и направления первичного поля в точке измерения.

- Механическая стабилизация измерительной установки с тем расчетом, чтобы ни расстояние, ни углы взаимной ориентации приемника и передатчика в процессе работы установки не изменялись. При механической стабилизации приемник и передатчик объединяются единой механической несущей конструкцией, и их взаимное положение полагается неизменным, в этом предположении расчетное значение первичного поля может быть вычтено из результатов измерений.
- Определение значений набора геометрических параметров измерительной установки методами углового и пространственного позиционирования, вычисление на их основе значений вектора первичного поля в точке измерения и введение в результаты измерений соответствующих поправок. Здесь следует заметить, что для большинства аэроэлектроразведочных систем первичное поле в результатах измерений многократно превышает поле отклика, поэтому метод требует очень высокой точности определения геометрических параметров.

Кроме того, аэроэлектроразведочные системы по типу конструкции установки могут быть отнесены к

- разнесенным, у которых приемник и передатчик пространственно разнесены на значительное расстояние и перемещаются друг относительно друга, будучи связанными гибким тросом;
- сосредоточенным, у которых приемник и передатчик находятся в непосредственной близости друг от друга, но не обязательно связаны единой жесткой конструкцией;
- жестким, у которых приемник и передатчик жестко скреплены друг с другом единой механической конструкцией и теоретически не меняют своего относительного положения.

5. Помехи и искажающие факторы при аэроразведочных измерениях

На работу аэроразведочной измерительной системы оказывают влияние различные возмущения, возникающие при возбуждении зондирующего поля и его измерении. К ним относятся шумы и помехи, а также внутренние искажающие факторы [10]:

1. Искажения при измерении поля:

- тепловой шум датчиков и электронных устройств приемной системы;

- искажения, обусловленные неидеальностью импульсной характеристики измерительной системы и изменением ее формы во времени вследствие теплового дрейфа параметров электронных элементов измерительной системы.

2. Искажения при возбуждении поля:

- появление вторичных источников поля, обусловленных вихревыми токами в электропроводящих элементах несущей конструкции передающей системы (например, вихревые токи в обшивке летательного аппарата-носителя);

- искажения, связанные с неидеальностью импульсной характеристики преобразователя сигналов передатчика;

- тепловой дрейф параметров электронных элементов передающей системы.

3. Искажения, связанные с движением измерительной установки:

- помеха, вызванная вибрациями приемной системы в постоянном магнитном поле земли

- неконтролируемое влияние изменений пространственного расположения приемной и передающей систем друг относительно друга и всей измерительной установки относительно земли (геометрический шум).

4. Влияние эфира:

- помехи, обусловленные влиянием техногенных объектов (линий электропередач и других технических систем), а также естественных электромагнитных полей земли и ионосферы, дальних и ближних гроз.

Даже в современной литературе по аэроэлектроразведочным системам с точки зрения оценки степени искажений не делается существенных различий между влиянием шумов, помех и искажающих факторов. Между тем, принципиальная разница между ними заключается в том, что влияние шумов и помех носит случайный характер, принципиально неотвратимо и зависит только от устройства датчиков и других элементов системы, а влияние искажающих факторов детерминировано, обусловлено влиянием вполне наблюдаемых физических процессов и теоретически может быть скомпенсировано. В приведенном списке к неконтролируемым влияниям безоговорочно могут быть отнесены только тепловые шумы и помехи реального эфира, и лишь в некоторой степени – влияние вибраций на работу приемной системы. Все же остальные рассмотренные факторы поддаются контролю, детерминированы, а потому и искажения, обусловленные ими, в принципе могут быть скорректированы. Такой подход особенно актуален в отношении совершенствования разнесенных аэроэлектроразведочных измерительных систем, наиболее подверженных неконтролируемому влиянию.

6. Принципы организации и особенности измерений в разнесенных аэроэлектроразведочных системах

Класс разнесенных аэроэлектроразведочных систем в настоящее время не столь многочислен, как в эру бурного развития в 60–70-е годы. При аэрогеофизических исследованиях на западе на долю разнесенных систем приходится не более 20% работ. В некотором смысле это объясняется приверженностью традициям, но все же главной причиной является отсутствие значительного числа таких установок, объясняемое технической сложностью аппаратуры и алгоритмов обработки регистрируемой информации. В России же разнесенные системы являются наиболее распространенными и по эффективности применения не уступают западным.

Сегодня к классу разнесенных относят зондирующие установки двух типов: частотные квадратурные, а также временные, реализующие метод переходных процессов.

7.1. ЧАСТОТНЫЕ КВАДРАТУРНЫЕ СИСТЕМЫ

Эти установки относятся к классу систем с неполным извлечением геофизически значимой информации.

Пусть поле возбуждающего источника является монохроматическим: $M(t) = M_0 \cos \omega_0 t$ (в комплексном частотном представлении $M(\omega_0) = M_0$). Тогда в рамках несколько упрощенной модели в частотном представлении совокупное измеряемое поле от всех наведенных в среде вторичных вихревых токов, а также основного возбуждающего может быть представлено выражением

$$(13) \quad H_{\Sigma}(\omega_0) = j \left(\sum_i \frac{D_i \omega_0}{(1 + \omega_0^2 \tau_i^2) R_i} \right) M_0 + \left\{ \left(\sum_i \frac{D_i \omega_0^2 \tau_i^2}{(1 + \omega_0^2 \tau_i^2) R_i} \right) M_0 + G_3 M \right\}.$$

Здесь D_i – геометрический фактор i -го элемента композиции источников вторичного поля; τ_i – его постоянная времени; G_3 определяет значение первичного поля в точке измерения.

В приведенном выражении член, заключенный в фигурные скобки, представляет действительную часть измеренного комплексного вектора. Он является суммой полного вектора первичного поля и действительной частью поля отклика. Полное разделение этих полей на практике является очень сложной задачей, однако выделение из всей совокупности одной лишь мнимой составляющей приведенного выражения, как нетрудно видеть, не подверженной непосредственному влиянию первичного поля, можно относительно просто осуществить синхронным детектированием принятого сигнала на частоте ω_0 .

Здесь важно, что квадратурная составляющая, являющаяся лишь частью геофизически значимой информации, хотя и не в полной мере, но все же отражает влияние свойств зондируемой среды.

В квадратурных системах при обработке сигналов во внимание принимается только мнимая (квадратурная) часть частотной характеристики. Именно поэтому они и получили такое название [9].

Сложностью технической реализации квадратурных систем является необходимость преодоления влияния нескольких искажающих факторов. В частности, в акте измерения регистрируется, собственно, не значение измеряемого поля, а лишь сигнал после приема и усиления:

$$(14) U_{\Sigma}(\omega) = W_R(\omega) \left(\sum_i \frac{D_i(j\omega + \omega^2\tau_i^2)}{(1 + \omega^2\tau_i^2)R_i} \right) (\mathbf{n}, M(\omega)) + W_R(\omega)G_3M(\omega).$$

В приведенном выражении $W_R(\omega)$ представляет масштабный коэффициент, комплексное матричное (3×3) значение частотной характеристики приемника на частоте ω . С учетом неизбежной при технической реализации неидеальности этой частотной характеристики, второй член выражения, связанный с первичным полем, уже не является чисто действительным (синфазным) вектором. А поскольку по абсолютной величине он многократно больше первого, обусловленного полем отклика, после такого измерения выделяемая в сигнале квадратурная часть зависит от первичного поля.

Комплексная матрица частотной характеристики $W_R(\omega)$, хотя изначально и близка по значению к единичной, тем не менее принципиально нестабильна и зависит, в частности, от температуры различных элементов системы – приемных рамок, передающей петли, усилителей и т.п. Для уменьшения степени этого влияния абсолютную величину параметра G_3 важно по возможности уменьшить. Этого можно, в частности, добиться максимальным приближением приемника к земле с одновременным отдалением его от передатчика. Именно по этой причине длина троса-кабеля квадратурной резнесенной системы F-400 (Канада) [11] составляла 300 м при высоте движения приемника над землей около 50 м. Соотношение абсолютных значений поля отклика над хорошо проводящим разрезом и первичного поля составляло 10–15%. Даже с учетом того, что стабильность измерительных параметров была всего 0,5–1%, значение квадратурной компоненты поля отклика измерялось с точностью порядка 10%. Такая точность была вполне удовлетворительной для 70-х годов, но работа с такой длиной троса-кабеля при малой высоте приемника над землей была очень сложна даже

при полетах над равнинной местностью, не говоря уже о горных районах.

Другим фактором, искажающим процесс измерений, является возникновение в обшивке фюзеляжа летательного аппарата и других элементах конструкции передающей системы наведенных токов. По своей природе эти вихревые токи ничем не отличаются от вихревых токов, наводимых в зондируемой среде, и зачастую создаваемое ими поле в точке расположения приемника даже превышает величину поля отклика от земли. Задачу подавления влияния вихревых токов, возникающих в обшивке, отчасти удастся решить введением в передающую систему дополнительного диполя с тем расчетом, чтобы его поле скомпенсировало поле токов, наведенных в фюзеляже. Этот принцип компенсации был использован в квадратурной разнесенной системе ДИП-А3 (Россия) [5].

Важно отметить, что квадратурные системы даже при идеальных характеристиках приемника обладают важной особенностью, существенно ограничивающей их применение. Из (13) хорошо видно, что значение измеряемой квадратурной составляющей оказывается равным нулю как над идеальным изолятором ($R \rightarrow \infty$), так и над идеальным проводником ($\tau \rightarrow \infty$). Из формулы (14) также видно, что регистрация квадратурной составляющей отклика от ярко выраженных проводников ($\tau \rightarrow \infty$) становится возможной только на очень низких частотах ($\omega \rightarrow 0$), недоступных при технической реализации аэроэлектроразведочной установки.

7.2. ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА МЕТОДЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (МПП)

Согласно приведенной классификации, установки, основанные на методе переходных процессов [6], следовало бы отнести к классу систем с полным представлением геофизически значимой информации, однако по причине сложностей технического характера она может быть выделена лишь фрагментарно.

Зондирующее поле абстрактной МПП-системы задается ступенчатой функцией. Теоретически, после мгновенного сту-

пенчатого переключения форма изменения регистрируемого магнитного поля во времени с точностью до амплитудного коэффициента, обусловленного геометрическими факторами, повторяет переходную характеристику геоэлектрического разреза.

Очевидная простота и лаконичность базового принципа МПП по сравнению с частотным электромагнитным зондированием во многом предопределила повышенный интерес к их разработке и совершенствованию. Особенно важными представлялись две кажущиеся очевидными возможности:

- Корректно измеренная импульсная характеристика геоэлектрического разреза теоретически представляет собой полную геофизически значимую информацию.
- Влияние первичного поля оказывается исключенным в силу самого принципа наблюдения сигнала после импульсного воздействия.

Детальный анализ, однако, показывает, что МПП-системы обладают рядом особенностей, ограничивающих эти их преимущества.

1. Строго говоря, корректная техническая реализация системы и метода переходных процессов невозможна в принципе, так как физически не реализуемо мгновенное выключение зондирующего поля. На практике прибегают к зондированию трапецеидальными, треугольными или полусинусоидальными импульсами, что существенно меняет форму сигналов и по сути разрушает стройную простоту метода поисковой интерпретации (12), поскольку при непрямоугольной форме зондирующих импульсов непосредственное наблюдение переходной характеристики оказывается невозможным.

2. Для выделения полезного сигнала от ярко выраженных проводящих объектов приемник МПП-системы должен обеспечивать высокую чувствительность при поздних временах спада поля отклика. В то же время, слабо проводящие поверхностные объекты проявляют себя на ранних временах, имеют малое значение постоянной времени и значительную амплитуду поля отклика (так как они располагаются ближе к измерительной установке). Далеко не все они при этом являются «геологиче-

ским шумом», а могут быть и важными объектами поиска. С учетом того, что сигнал отклика имеет экспоненциальный характер, а непосредственно в момент переключения напряжение на концах приемных рамок принимает бесконечное значение, для корректного измерения приемник должен иметь неограниченный динамический диапазон. На практике при временных измерениях интервал времени, непосредственно следующий за переключением зондирующего поля, исключается из процесса измерения. В продолжение этого времени система оказывается невосприимчивой по отношению к откликам от земли. «Незамеченными» оказываются слабо проводящие объекты, характеризующиеся малым значением постоянной времени спада поля отклика.

По тем же причинам зондирующие импульсы и паузы между ними не могут быть значительными – экспоненциально убывающая амплитуда сигнала отклика на поздних временах быстро становится слишком малой на фоне шумов эфира. Производство измерений на существенно поздних временах требует экспоненциального увеличения магнитного момента источника возбуждающего поля, который неизбежно оказывается ограниченным по энергетическим соображениям. Таким образом, временной интервал измерения переходной характеристики оказывается ограниченным и в области поздних времен.

3. Приемная система аэроразведочной установки по самой своей природе не вполне равномерно движется в магнитном поле земли. При этом в спектре принятого сигнала неизбежно наблюдается влияние низкочастотной помехи, амплитуда которой весьма велика. Для подавления этой помехи в приемно-усилительном тракте приемной системы обычно применяются аппаратные фильтры верхних частот. Технически их реализация не вызывает существенных трудностей, однако после их введения частотная и импульсная характеристики приемной системы оказываются существенно неидеальными. Вследствие этого после выключения зондирующего поля на выходе приемника даже в отсутствие зондируемой среды наблюдается сигнал чисто аппаратурной природы, повторяющий форму импульсной характеристики приемной системы. В присутствии отклика от

земли этот сигнал становится помехой. Особенно неприятно, что амплитуда и форма этого сигнала зависят от амплитуды и направления вектора первичного поля в точке приема — параметров, контроль которых никак не предусмотрен базовым принципом МПП.

4. Приемные рамки индукционного приемника электроразведочной системы реагируют не на само магнитное поле, а на его изменение во времени. Поэтому медленно убывающий отклик от хорошо проводящего объекта оказывается «невидимым». Напряжение на концах чувствительной приемной рамки с учетом (11) будет следующим:

$$(15) U(t) = -\mu_0 S \frac{dH(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \exp(-t/\tau) DM_0, \quad t > 0,$$

Очевидно, что в такой измерительной установке наблюдение отклика от ярко выраженных проводников ($\tau \rightarrow \infty$), так же как и для квадратурных частотных систем, оказывается невозможным, и информацию, на основании которой невозможно отличить идеальный проводник от идеального изолятора, никак нельзя считать геофизически значимой в полной мере. Отклик от очень ярко выраженного проводника можно было бы наблюдать во время действия фронта зондирующего импульса, однако в этом случае во всей полноте проявляет себя проблема непосредственного влияния первичного поля на результаты измерений.

7. Производственное применение аэроэлектроразведочных комплексов и пути повышения его эффективности

Эффективность применения той или иной аэроэлектроразведочной измерительной системы в ходе геофизических работ определяется не только особенностями и качеством электромагнитного зондирования, но и, в не меньшей степени, общими принципами единой производственной технологии, объединяющей:

- планирование полетного задания и управления аэросъемочным полетом;

- измерение информации на борту летательного аппарата-носителя;
- контроль и регистрацию измерительной информации;
- вычислительную обработку полученной информации;
- интерпретацию полученных результатов.

Основной подход к организации аэрогеофизических работ исторически основан на многолетних традициях геофизического картирования и в общих чертах хорошо описывается простой формулой: произвести измерения необходимых сигналов в точках с заданными географическими координатами, полученные результаты представить в виде параметров, отражающих геологическое строение исследуемой территории, а их распределение по исследуемой территории – в виде карт и разрезов [10]. Процесс интерпретации, завершающий технологию, позволяет на их основе перейти к пониманию особенностей геологического строения и поисковых перспектив в отношении тех или иных видов полезных ископаемых.

В соответствии с этой постановкой структура большинства бортовых аэрогеофизических комплексов в настоящее время представлена следующими компонентами:

- Система средств геофизических измерений, представляющих собой необходимые датчики – источники геофизической информации. В качестве элемента в их число входит и электромагнитная зондирующая система.
- Система управления аэросъемочным экспериментом, обеспечивающая необходимую навигационную поддержку – средства глобального позиционирования, высотометры, датчики курса и т.п., программное обеспечение для решения штурманских задач, навигационно-пилотажные индикаторы, средства управления полетным заданием.
- Система комплексной регистрации геофизической и навигационной информации, контроля и визуализации.

До конца прошлого века такое разделение было вполне строгим, указанные системы были четко индивидуализированы на аппаратном уровне. Сегодня же функции навигационного обеспечения, управления полетом, комплексной регистрации,

визуализации и автоматического контроля, и даже управления работой геофизических приборов зачастую объединяются в структуре единой бортовой информационно – управляющей вычислительной системы. В результате в аппаратном плане контуры структуры бортового комплекса несколько размываются, но в информационном плане она традиционно сохраняется. Это, в свою очередь, определяет основные требования к используемым аэрогеофизическим приборам и принципам информационного взаимодействия.

Общая эффективность бортового аэроэлектроразведочного комплекса зависит, таким образом, от эффективности работы каждой их входящих в него систем, полноты регистрации получаемых данных и надежности информационного взаимодействия между системами.

За годы истории развития аэроэлектроразведочных методов создано несколько десятков различных типов зондирующих систем и комплексов. Несмотря на общее единство базовых принципов далеко не все они нашли свое применение в арсенале современных технологий. За эти годы существенно менялись цели исследований, приоритеты поисковых задач и связанные с ними подходы к оценке эффективности, однако неизменно важными составляющими были и остаются следующие:

- **Поисковая эффективность.** Степень полноты и геофизической значимости информации, получаемой в результате измерений. Глубинность и детальность зондирования, пригодность получаемых данных для геолого-геофизической интерпретации при решении тех или иных конкретных картировочных и поисковых задач, степень универсальности получаемой информации применительно к различным задачам и условиям поиска.
- **Измерительная эффективность.** Аппаратурное качество зондирования, чувствительность и точность измерений.
- **Картографическая эффективность.** Качество привязки получаемых данных к географическим координатам и качество покрытия исследуемой территории сетью измерительных отсчетов.

- Производственная эффективность. Технологичность, удобство и простота использования, полнота использования летного времени, надежность, помехозащищенность, способность работать в широком диапазоне условий аэросъемочного полета (в горных районах, при боковом ветре, в условиях болтанки т.п.).

8.1. ПОИСКОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Как показано выше, форма и структура геофизически значимой информации, регистрируемой аэроэлектроразведочной измерительной системой, так или иначе ограничена, степень полноты у разных систем различна. Эти особенности определяют, в конечном счете, специфику их использования, поисковые возможности и эффективность. Сегодня спектр задач аэрогеофизических исследований очень широк: структурно-геологическое картирование, исследование мощности рыхлых отложений, поиск месторождений различных полезных ископаемых, инженерные и гидрогеологические исследования, батиметрия на пресных и соленых акваториях. Сегодня при производственных работах предпочтение отдается универсальным системам, способным работать в различных геологических условиях – от ярко выраженных проводников до ярко выраженных изоляторов – с сохранением информативности геофизически значимой информации во всем этом диапазоне.

В свете этого главным показателем поисковой эффективности является степень полноты, точности и детальности определения формы частотной характеристики для частотных систем и импульсной характеристики – для временных. Следует также отметить, что при решении поисковых задач предпочтение обычно отдается временным системам, а при решении картировочных – частотным [5].

При интерпретации полученной аэроэлектроразведочной информации важную роль играет частотный диапазон зондирующего сигнала, а также детальность регистрируемой частотной характеристики – количество значимых частот и их распределение по частотному диапазону. Здесь важно, что для результатов аэроэлектроразведочных измерений характерно логнормальное

распределение как по шкале физических характеристик, так и по шкале частот [3]. В связи с этим наполнение спектра зондирующих частот близко расположенными высокочастотными гармониками является малоэффективным. В то же время наличие значительного числа зондирующих частот в низкочастотной части спектра существенно расширяет возможности интерпретации результатов измерений.

Основным направлением повышения поисковой эффективности аэроэлектроразведочного комплекса является применение зондирующей системы с наиболее полным представлением частотной или импульсной характеристики. Особо перспективным в смысле поисковой эффективности является применение зондирующих систем с комбинированным представлением результатов – как в форме частотной, так и в форме импульсной (переходной) характеристик, поскольку это существенно расширяет спектр методов интерпретации результатов зондирования.

8.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Инструментальное качество аэроэлектроразведочного комплекса определяется точностью работы всех источников информации, в частности тем, насколько корректно выполнено каждое измерение в зондирующей системе и насколько полно и точно сформирован единый блок информационных параметров, к этому акту относящийся. В состав этого блока в качестве дополнительных параметров, как правило, включаются данные, описывающие условия измерений: высота установки над землей, пространственная и угловая ориентации, магнитный момент передатчика, свойства самой измерительной системы и т.д. Инструментальная точность аэроэлектроразведочной системы в целом определяется точностью измерений для каждой из компонент регистрируемого блока данных. Большое значение при оценке измерительной эффективности имеет степень подавления влияния искажающих факторов и, в первую очередь, геометрического шума.

Следует отметить, что в различных аэроэлектроразведочных системах одно и то же качество регистрации частотной или

импульсной (переходной) характеристики достигается при разной точности измерения зондирующих сигналов и дополнительных параметров.

Основными направлениями повышения измерительной эффективности являются:

- максимальное подавление помех реального эфира;
- максимальное подавление помех, связанных с движением приемной системы в постоянном магнитном поле земли (микрофонного эффекта);
- устранение влияния неконтролируемого изменения геометрических параметров измерительной установки и связанного с ним изменения степени влияния первичного поля (геометрического шума);
- компенсация влияния несовершенства передающей системы;
- компенсация влияния несовершенства приемной системы;
- повышение точности измерения параметров, характеризующих условия измерений.

8.3. КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Картографическая эффективность аэроэлектроразведочного комплекса определяется тем, насколько точно в полном наборе результатов выполнена пространственная географическая привязка каждой из точек зондирования, и тем, насколько равномерно эти точки покрывают исследуемую территорию. Кроме того, существенно важным является соответствие фактических траекторий движения измерительной установки заданным линиям пути как в плане, так и по высоте. В свете этого картографическая эффективность аэрогеофизического комплекса зависит от точности и синхронности регистрации значений координат и времени получения информационных кадров аэрогеофизической информации, а также от точности и динамики управления движением измерительной установки.

Следует особо отметить, что большинство аэроэлектроразведочных установок являются сложными, тяжелыми, крупногабаритными, пространственно протяженными буксируемыми

системами, управление движением которых является сложной задачей. В то же время для эффективной работы зондирующей системы требуется, чтобы установка перемещалась над землей на минимальной высоте – 30–50 м. В условиях гражданского применения при полетах в таких условиях по соображениям безопасности запрещено пользоваться автопилотом, точность следования заданным линиям пути должна обеспечиваться пилотом в режиме ручного управления.

Высокоточная регистрация координатно-навигационной информации сегодня обеспечивается с помощью средств глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Высота аэроэлектроразведочной установки над дневной поверхностью измеряется с помощью радио- или лазерных высотомеров. Исходя из современных требований качества геофизического картирования в ходе аэрогеофизических работ точность координатной привязки не должна превышать 1–2 м, а точность следования заданной линии пути – 5–10 м.

Наиболее важными направлениями повышения картографической эффективности являются:

- повышение точности географического позиционирования и координатной привязки точки измерения;
- повышение точности проводки летательного аппарата по заданной линии пути;
- повышение точности регистрации параметров, определяющих условия измерения — высоты над землей и пространственной ориентации зондирующей установки.

8.4. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Производственная эффективность аэроэлектроразведочного комплекса (и аэрогеофизической технологии в целом) складывается из показателей удобства и простоты использования, технической надежности комплекса, а главным образом, из количественного выражения материальных затрат, необходимых для выполнения съемки на той или иной площади. Существенное влияние на показатели производственной эффективности оказывает способность комплекса эффективно работать в сложных географических и метеорологических условиях.

Основным показателем производственной эффективности аэроэлектроразведочного комплекса является расчетная производительность съемки – количество кондиционно покрытых сетью измерений погонных километров, приходящееся на один затраченный летный час с учетом всех непроизводительных затрат (контрольно-настроечных операций, разворотов и переходов с маршрута на маршрут и т.п.).

Главными способами обеспечения высокой производственной эффективности является:

- увеличение скорости движения аэроэлектроразведочной установки;
- сокращение объема и продолжительности контрольно-настроечных операций;
- сокращение времени перехода с одного съемочного маршрута на другой.

Немаловажным фактором, определяющим производственную эффективность, является также степень автоматизации работы аэрогеофизического комплекса, поскольку, как правило, значительная часть непроизводительных затрат летного времени связана с ошибками в работе бортоператоров.

Важно заметить, что различные пути повышения эффективности связаны между собой. В частности: поисковая эффективность тесно связана с точностью и качеством измерительного процесса, а эффективность управления движением летательного аппарата не только определяет качество покрытия территории точками измерений, но и объем непроизводительных затрат летного времени. При этом многие задачи, возникающие в этой связи, могут быть решены методами теории оптимального управления и оценивания.

8. Заключение

На основании вышеизложенного можно констатировать, что эффективность применения аэроэлектроразведочных комплексов можно повысить, решив следующие технические задачи:

1. Проведя техническое совершенствование основных элементов зондирующих измерительных систем, увеличение точ-

ности и стабильности измерений, глубины подавления влияния помех реального эфира и помех, связанных с движением измерительной установки.

2. Дополнив структуру аэроэлектроразведочной измерительной установки подсистемой непрерывного контроля ее измерительных параметров, калибровки и мониторинга характеристик всего приемно-измерительного тракта.

3. Обеспечив дополнительную стабилизацию измерительных характеристик путем коррекции полученных результатов с учетом данных калибровки и мониторинга параметров.

4. Дополнив структуру аэроэлектроразведочного комплекса подсистемой контроля изменчивости геометрических параметров зондирующей системы, существенно влияющей на качество получаемой информации.

5. Усовершенствовал систему навигационного обеспечения бортового комплекса летательного аппарата-носителя аэроэлектроразведочной зондирующей установки путем оптимизации алгоритмов управления движением в режимах следования заданной линии пути и захода на съемочный маршрут в плане повышения точности проводки и экономии летного времени.

6. Разработав необходимые алгоритмы автоматической настройки и калибровки всего аэроэлектроразведочного комплекса в плане сокращения времени на выполнение контрольно-настроечных операций.

Указанный комплекс мер повышения эффективности максимально актуален для совершенствования аэроэлектроразведочных комплексов, использующих в качестве зондирующей установки разнесенную частотную или разнесенную временную систему.

Литература

1. БЛОХ Ю.И., ГАРАНСКИЙ Е.М., ДОБРОХОТОВА И.А. и др. *Низкочастотная индуктивная электроразведка при поисках и разведке магнитных руд.* – М.: Недра, 1986. – 192 с.
2. ДУБРОВСКИЙ И.М., ЕГОРОВ Б.В., РЯБОШАПКА К.П. *Справочник по физике.* – Киев.: Наукова Думка, 1986. – 557 с.

3. ЛАДЫНИН А.В. *Физические свойства горных пород: учебное пособие*. – Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск, 2010. – 101 с.
4. МОДИН И.Н., ШЕВНИН В.А. *Соответствие данных электроразведки логнормальному закону распределения // Прикладная геофизика*. – 1984. – Вып. 109. – С. 75–82.
5. ПЕТРОВ С.И., НОВАК В.Д., ТИХОМИРОВ О.Д. *Аэроэлектроразведка методом ДИП // Разведка и охрана недр*. – 2006. – №4. – С. 38–42.
6. УЭЙТ ДЖ.Р. *Геоэлектромагнетизм*. – М: Недра, 1987. – 235 с.
7. BRYAN M.W., HOLLADAY K.W., BERGERON CLYDE J. *MIM and nonlinear least-squares inversions of AEM data in Barataria basin, Louisiana // Geophysics*. – July-August, 2003. – Vol. 68, No. 4. – P. 1126–1131.
8. KAUFMAN A.A. *A paradox in geoelectromagnetism, and its resolution, demonstrating the equivalence of frequency and transient domain methods // Geoexploration*. – 1989. – No. 25. – P. 287–317.
9. KAUFMAN A.A., ORISTAGLIO M., ALEKSEEV D. *Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics*. – Amsterdam: Elsevier, 2014.
10. PALACKY G.J., WEST G.F., *Airborne electromagnetic methods // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. – 1988. – Vol. 2. – P. 811–879.
11. SEIBERL W.A. *The F-400 series quadrature component airborne electromagnetic system // Geoexploration*. – 1975. – Vol. 13, Issues 1–4. – P. 99–115.
12. SPIES B.R., FRISCHKNECHT F.C. *Electromagnetic sounding // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. – 1988. – Vol. 2. – P. 285–406.

AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEMS AND IMPROVEMENT OF THEIR EFFICIENCY

Pavlov Boris, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow,
Doctor of Science, professor (pavlov@ipu.ru).

Volkovitskiy Andrey, Institute of Control Sciences of RAS, Mos-
cow, Cand. Sc. (avolkovitsky@yandex.ru), (Moscow, Profsoyuznaya
st., 65, (495)334-75-80).

Abstract: Brief description of functioning principle of airborne electromagnetic (AEM) systems is given and purposes of these systems are described. Primary focus is made on technical and methodical aspects of signal measurements for low-frequency active sounding systems and on technology of their practical use. Principles of evaluation of AEM system measuring, mapping and operational efficiency are described and main approaches to improve efficiency are shown.

Keywords: airborne electromagnetics, electromagnetic sounding system, airborne geophysical system.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым*

*Поступила в редакцию 16.02.2015.
Опубликована 31.03.2015.*