

АЛЬТЕРНАТИВЫ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

В. С. Могилатов

Один известный геофизик как-то заметил (может быть, и невсерьез): научное сообщество устроено так, что все враз начинают заниматься модными темами, а работы тех, кто занимается чем-то другим, никого не интересуют и их, по-видимому, даже не читают. Случилось так, что автор этой статьи надолго увлекся исследованиями принципиальных возможностей зондирования становлением (ЗС), не ограничиваясь теми, которые даст возбуждение традиционными источниками - линиями АВ и петель. На это его в свое время натолкнули необычные свойства процесса становления от вертикального электрического диполя, отличающиеся от рассматриваемых в ЗС.

В настоящее время все занимаются эффектами ВП в ЗС, сейсмoeлектрикой и прочими тонкими материями. Прошедшая не так давно дискуссия по поводу "сверхразрешения" в электроразведке оставила только досадные чувства. В поле все то же, эксперимент все тот же, та же экспериментальная установка, та же старая аппаратура (обычно чуждая вопросам стандартизации и метрологии), а эффекты вдруг появились в большом количестве.

Что ни говори, а произошел кризис электроразведки с контрольными источниками. Потеряны огромные области глубинного применения. Обычное объяснение, как бы само собой разумеющееся, состоит в том, что вполне совершенная электроразведка пала жертвой экономических трудностей, а еще более совершенная электроразведка возможна и уже есть (и даже уже была), если приглядеться к материалам с точки зрения неклассических эффектов и подходов. Это неправда, точнее, далеко не вся правда. Надо заметить, что резкое свертывание электроразведочных работ по причинам, лежащим вне геофизики, произошло кстати. Мировая тенденция состоит в малоглубинном применении искусственно возбуждаемых электромагнитных полей. Глубинное применение, как оказалось, дает результаты, не оправдывающие затрат. И причины этого лежат уже в самой электроразведке. Они состоят вовсе не в пренебрежении некими неклассическими феноменами, а по нашему мнению, в плохом и неполном использовании классических оснований электроразведки. О чем идет речь?

Когда автор был еще начинающим электроразведчиком, он никак не мог понять, что же общего между традиционной электроразведкой на постоянном токе и набиравшей тогда силу импульсной методикой с петлевым возбуждением и приемом. В значительной мере в

этой статье мы будем отвечать на тот давний наивный вопрос. Сейчас можно коротко сказать, что методы постоянного (прямого) тока основаны на использовании постоянного ТМ-поля, тогда как импульсная электроразведка с петлями имеет дело с переходным ТЕ-процессом и общего тут, действительно, не так много.

Известные методы зондирования становлением (фактически использующие только поле магнитного типа) вовсе не являются прямым развитием методов постоянного тока, но они составляют вновь возникшую боковую ветвь электроразведки. Вот почему, несмотря на, казалось бы, прогресс в виде ЗС, методы постоянного тока живут и развиваются. Прямым наследником электроразведки на постоянном токе явился бы метод, использующий переходный процесс электрического типа. Но об этом мы и будем говорить.

Разумеется, общим является использование многоликого электромагнитного поля, свойства которого в интересующем нас диапазоне частот и применительно к геоэлектрической среде таковы, что даже если источник сосредоточенный и таковой же приемник, то сигнал в приемнике, вообще говоря, определяется всей средой в немалой окрестности источника и приемника. Квазистационарное электромагнитное поле, которое мы обычно используем, описывается уравнениями типа теплопроводности или диффузии, хотя это все же более сложный объект, нежели поля тепловые или диффузии, особенно во взаимодействии с геологической средой. Тем не менее эта ситуация может вызвать сочувствие сейсморазведчика. Однако в электроразведке к этому привыкли. Таковы физические основания нашего метода, который все-таки нельзя полностью вытеснить сейсмическим, не разрушая геофизику.

Все же посмотрим, как можно повлиять на упомянутую ситуацию, т. е. на локальность, разрешающую способность, детальность, глубинность и прочие характеристики электромагнитных зондирований, имея в своем распоряжении различные контролируемые источники. Мы не можем не возбуждать всю среду (и "нужные" ее области, и "ненужные"), но мы можем попытаться оптимально организовать возбуждаемые в земле токи с целью получения максимального отклика от интересующего объекта. Надеемся, читатель отделит наш подход от "метода чистой аномалии", когда физическое явление не затрагивается, а выигрыш пытаются получить только за счет ограниченной пространственно-временной выборки и фиксации отклика.

Дуальная модель индукционной электроразведки

Построим физико-математическую модель индукционной (т. е. на переменных полях) электроразведки с контролируемыми источниками, условное изображение которой приведено на рис. 1. Все многообразие возможных различных питающих установок, располагаемых на земной поверхности, мы можем формально описать, введя распределение поверхностной плотности (в А/м) стороннего тока, меняющегося синхронно $-\vec{j}_c(x, y)q(t)$. Такое описание источника включает традиционные питающие установки, образованные отрезками провода и точечными заземлениями, но также и менее привычные установки с распределенными проводниками и заземлениями. Например, для двух основных источников в наземной электроразведке - горизонтальная заземленная по концам линия (ГЭЛ) и токовая петля - поверхностная плотность определяется следующим образом:

$$\text{ГЭЛ} - j_{cx}(x, y) = I\delta(y) [U(x + dx_0/2) - U(x - dx_0/2)],$$

$$\text{петля} - j_{c\phi}(r) = I\delta(r - a),$$

где $U(x)$ - функция Хевисайда, $\delta(x)$ - дельта-функция Дирака, dx_0 - длина ГЭЛ, a - радиус токовой петли.

Приняв в качестве базовой модели среды одномерную, горизонтально-однородную модель и применяя уравнения Максвелла с соответствующими условиями, мы легко получим решение для любой компоненты поля в виде линейного двучлена, как на рис. 1 ($\hat{F}$ и $\hat{F}^*$ означают соответственно прямое и обратное линейные преобразования по латеральным координатам и несущественны для дальнейших рассуждений).

Таким образом, поведение поля определяется двумя независимыми функциями, X и V - решениями двух различных краевых нестационарных задач. Иначе говоря, процесс возбуждения и распространения поля от произвольного источника есть суперпозиция двух различных процессов. Вклад каждого процесса определяется конфигурацией источника (стороннего тока) посред-

ством значений функций $\text{div} \vec{j}_c(x, y)$ и $\text{rot}_z \vec{j}_c(x, y)$. Понятно, вспоминая физический смысл дивергенции и ротора, что одна составляющая определяется стоками или, в нашем случае, током, стекающим (втекающим) с заземлений (возбуждается гальваническим путем), а другая составляющая зависит от вихревой компоненты в распределении стороннего тока (возбуждается индуктивным путем). Речь идет о том, что в электроразведке с контролируемыми источниками, в силу одномерности модели среды, имеет место разделение общего поля на E - и H -составляющие (поперечно-магнитное и поперечно-электрическое поля, ТМ (transverse magnetic) и ТЕ (transverse electric), поле электрического типа и поле магнитного типа, E - и H -моды). Итак, физико-математическая модель индукционной электроразведки с контролируемыми источниками, представленная условно на рис. 1, двуседна и симметрична по отношению к полям электрического и магнитного типов.

Вообще-то, автор знает, что "визуализированная" на рис. 1 модель не содержит принципиально новых истин, а пожалуй, покажется даже тривиальной тем, кто основательно занимался теоретическими аспектами геоэлектродинамики. В то же время автор совершенно убежден, что эта модель чрезвычайно важна, практична и никогда не должна ускользать из поля зрения электроразведчиков. Это-то как раз и происходит и служит досадным примером разрыва между фундаментальными теоретическими основами и практикой.

Рассматриваемая модель практична в теоретическом отношении, если можно так выразиться, отображая максимально компактное и прозрачное математическое описание электроразведки с контролируемыми источниками произвольной конфигурации. Такое описание приведено в работе [2], где в рамках единого процесса разделения переменных даны решения для гармонического режима, а также и для импульсного в двух представлениях (интеграл Фурье и ряд Фурье, по А. Н. Тихонову) для всех наземных источников. С этой точки зрения существующие монографии и учебники по электроразведке, отечественные и зарубежные, выглядят рыхлыми и бессистемными при изложении теории. Добавим только, что весьма удачно сочетаются такие приемы как выбор в качестве источника плоского распределения стороннего тока, учет его как условия на границе и отказ от вектор-потенциалов в пользу вертикальных компонент самого поля.

Но ведь эта модель немедленно приводит и к совершенно практическим и конкретным выводам и результатам. Легко заметить, что принципиальная двойственность электроразведки на практике не реализуется - слабо изучены свойства переменного тока ТМ-поля, не был известен и наземный источник переменного ТМ-поля, в объявленном смысле симметричной токовой петле. Любой электроразведчик, не задумываясь, объяснит, чем определяется поздняя стадия становления в среде с изолирующим основанием (суммарной продольной проводимостью), имея в виду, конечно же, поле магнитного типа, но вряд ли широко извест-



Рис. 1. ТЕ-ТМ-симметрия. Дуальная модель электроразведки

тен ответ по поводу ТМ-процесса в подобной ситуации (абсолютно другой!). Современная индукционная электроразведка (в частности, импульсная) основана практически лишь на использовании поля магнитного типа (применение линии АВ не изменяет этого факта). Это поле возбуждается индуктивно (например, петлей), и в целом речь идет об индуктивной электроразведке. Так что если говорить о кризисе электроразведки, то следует уточнить, что это кризис именно индуктивной импульсной электроразведки.

На поставленный (на рис. 1) вопрос ответ легко получить исходя из самой схемы - неизвестный ранее наземный источник ТМ-поля должен удовлетворять условию $\text{rot } \mathbf{j}_e = 0$ и это можно реализовать набором радиальных токовых линий (круговой электрический диполь - КЭД). Важнейший урок модели на рис. 1 состоит в том, что возможна альтернатива традиционной, сдающей свои позиции индуктивной электроразведке.

Необходимость альтернативы

Но должны ли мы воспользоваться предлагаемой альтернативой? Конечно, уже ясно, что метод ЗС в традиционных вариантах не решает ряд важных структурных задач. Будем прежде всего иметь в виду поиск месторождений углеводородов. Объяснить это можно с различных позиций. Мы обращаем внимание на следующий аспект. В физическом эксперименте, каковым является зондирование становлением, важно наблюдать нечто такое, что существенно (лучше на 100%) связано с исследуемым феноменом (скажем, с наличием и местоположением залежи). Если наблюдаемая величина носит в основном фоновый характер, то такой эксперимент нужно признать неудачным, нужна другая экспериментальная установка. Причем нельзя ограничиться особыми выборками в измерениях (как в методе чистой аномалии) - это всего лишь самообман. Похоже, физики именно так это и понимают, и они прошли большой путь, например в ядерной физике, от примитивных счетчиков до гигантских, очень сложных и точных ускорителей.

Сигнал становления в индуктивной импульсной электроразведке (например, в зондированиях в ближней зоне - ЗСБ) при решении тонких задач с очевидностью указывает на ЗСБ как негодный экспериментальный метод при прослеживании углеводородов - он (сигнал) почти целиком зависит от вмещающей толщи, очень мало от наличия объекта и совсем слабо и неопределенно от его контура. За все более тонкие результаты надо платить. Геоэлектрики же в отличие от физиков платить не желают и время от времени, вдохновляясь тонкими теоретическими эффектами, пытаются определять новые параметры структуры и состава среды, с удивительным оптимизмом полагаясь на старую экспериментальную схему, годную только для одного - изучения генерального распределения продольной проводимости в разрезе.

Нелепо надеяться, что посредством, например, ЗСБ будут решаться все более сложные задачи за счет незначительных усовершенствований в технике измерений и в интерпретации, при том что физические предпосылки (совершенно недостаточные) остаются все теми же - ТЕ-процесс, возбуждаемый токовой петлей (или линией). Фактически эти "удобные" источники похоронили структурную электроразведку, и альтернатива сейчас очень актуальна.

Другой важный аспект, настоятельно требующий альтернативы для петлевого (индуктивного) возбуждения, состоит в нетехнологичности установки "петля - петля" в структурной электроразведке при решении нефтепоисковых задач. Здесь требуется плотный площадной сбор информации, но реальный факт состоит в том, что практически работы с глубинными целями велись и ведутся соосной установкой. При каждом положении мощного источника (генераторная петля 1 км² и более) отклик фиксируется только в одной точке, что выглядит, конечно, безумием в глазах того же сейсморазведчика. Площадную информацию можно набирать только при перемещении всей установки, что очень трудоемко, и дело сводится к профильным работам или к весьма редкой площадной сети.

Но почему же не реализован площадной сбор информации при закрепленном источнике (петле)? Решение вполне очевидное, и, действительно, трудно даже перечислить все попытки, предпринятые в СССР и России по реализации такой технологии, которая обещала сделать электроразведку настоящим производственным методом. Такой достаточно результативной по отношению к затратам технологии, повторяем, не было создано и причина кроется в свойствах ТЕ-поля, возбуждаемого петлей или линией. Если для соосной установки сигнал зависит в основном от вмещающей толщи, но, по крайней мере, при перемещении всей установки устойчив и определяется все же геоэлектрической обстановкой, то при фиксированном источнике сигнал с приемной петлей самым радикальным образом зависит прежде всего от разности. Проиллюстрируем всю сложность этой проблемы, показав на рис. 2 рассчитанную нами в программе ПОДБОР кривую становления для разнесенной установки. Ситуация довольно реальная: проводящий пласт (3 Ом·м) перекрыт плохопроводящей толщей (400 м). Разнос составляет 900 м. Результат подтвержден расчетами по программе ЭРА, а также физическим моделированием (А. К. Захаркин). Мы наблюдаем в окрестности времени 1 мс резкий импульсный всплеск (шириной всего около 0,4 мс) и всего три перехода через 0. На таком изменчивом фоне, определяемом геометрией и вмещающей толщей, определять еще и некие слабые латеральные нарушения невозможно. Забавно, что такие примеры даже не были известны разработчикам (в рядах которых побывал и автор) площадных методов с закрепленным источником. Кажется, и сейчас все еще бытует представление, что кривая разнесенных зондирований должна иметь только один переход через ноль.

Мы говорили о петле, но работа с закрепленной линией не менее проблематична. Добавляется еще и неизометричность поля. Кстати, линия - сложный источник, состоящий из трех: двух заземлений (источники ТМ-поля, прямой ток) и токового отрезка (источник ТЕ-поля, посредством индуктивного возбуждения). В любой наблюдаемой компоненте на земной поверхности вклад ТМ-поля быстро исчезает. Линия - не альтернатива петле.

Заодно уже укажем на другие объективные и субъективные взаимосвязанные проблемы индуктивного метода, определяемого свойствами ТЕ-поля, - широкий латеральный охват среды возбуждаемыми токами (в то время как говорится о зондированиях вниз), горизонтальная система вихревых токов, одномерный, иногда в самых примитивных формах, подход к интерпретации

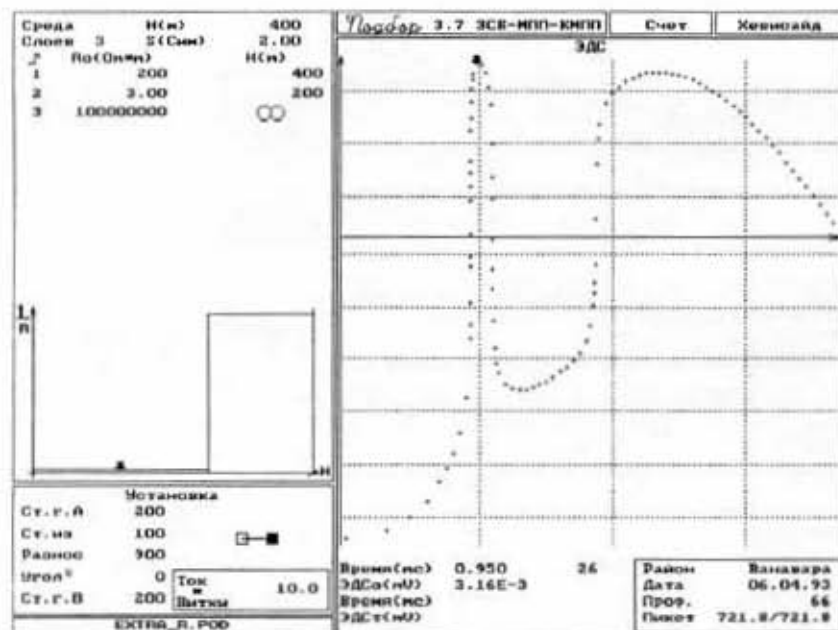


Рис. 2. Кривая становления для разнесенной установки "петля - петля"

(из-за наличия мощной фоновой одномерной составляющей в сигнале считается допустимым одномерный подход к интерпретации при исследованиях слабых латеральных неоднородностей - характерная иллюзия!). Неразрешимая проблема снятия фона, типичная для традиционных ЗС (например, ЗСБ), вовсе не техническая проблема, а принципиальная, связанная также со сложностью и неопределенностью нашего объекта изучения - геологической среды.

Когда-то метод становления поля возник, по сути, для преодоления прямого поля источника. В настоящую эпоху мы нуждаемся в преодолении в рамках ЗС прямого отклика вмещающей среды.

Зондирования вертикальными токами

Итак, вполне классическая теория квазистационарной геоэлектродинамики предоставляет нам возможность индукционных зондирований с применением чистого ТМ-поля. Можно говорить по аналогии с принятой терминологией, что речь идет о неиндуктивных зондированиях, в частности, о неиндуктивных импульсных зондированиях.

Но не так-то просто возбудить чистое ТМ-поле. Любой горизонтальный проводник с током, в частности подводящие провода, возбуждает долгоживущее ТЕ-поле. Чтобы пояснить направление наших мыслей, мы предлагаем как паллиатив уменьшить долю ТЕ-поля становления для известной установки "линия АВ", разбив ее на две одинаковые линии и включив одинаковый ток навстречу (рис. 3). Отклик среды, разумеется, сильно уменьшится в поздней стадии. Но ведь это за счет индуктивного процесса, связанного главным образом с вмещающей средой. Она все еще нужна вам? Кстати, мы самым серьезным образом рекомендуем такую конфигурацию при исследованиях латеральных неоднородностей (а не вмещающей среды), если условия на местности не позволяют реализовать более совершенный способ избавления от поля магнитного типа.

Практически единственный (с земной поверхности) реальный способ "погасить" индуктивный процесс и воспользоваться в его отсутствие гальваническим процессом состоит в реализации установки КЭД (круговой электрический диполь, см. рис. 3). Выше мы обосновали КЭД "на кончике пера" как конфигурацию стороннего тока, обеспечивающую в соответствии с дуальной моделью на рис. 1 $\text{rot } \mathbf{j}_e = 0$. Но в жизни, разумеется, все было прозаичнее, КЭД был предложен в 1982 г. [1] для узкой роли наземного аналога вертикальной электрической линии и долго воспринимался (в эпоху победного шествия индуктивной импульсной электроразведки) как курьез. Наиболее впечатляющим свойством поля, возбуждаемого КЭД, является отсутствие квазистационарного магнитного отклика на земной поверхности (и выше) одномерной слоистой среды.

Сейчас способ импульсной электроразведки с использованием КЭД в качестве питающей установки реализован. Зондирования вертикальными токами (ЗВТ) являются принципиально новым методом электроразведки. Новизна эта определяется сочетанием идеи метода (использование нестационарной поперечно-магнитной составляющей электромагнитного поля) с новым техническим решением (использование в качестве источника кругового электрического диполя (КЭД) - уникального возбудителя только ТМ-поляризованного поля).

Название метода отражает физическую основу, которой является ТМ-поле, имеющее вертикальную компоненту электрического поля. Согласно теории на земной поверхности горизонтально-слоистой среды в ква-

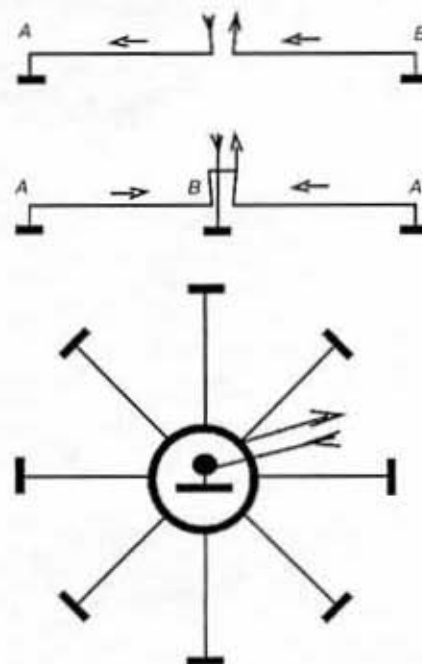


Рис. 3. Обычная линия АВ, "встречная" установка АВА' и установка КЭД

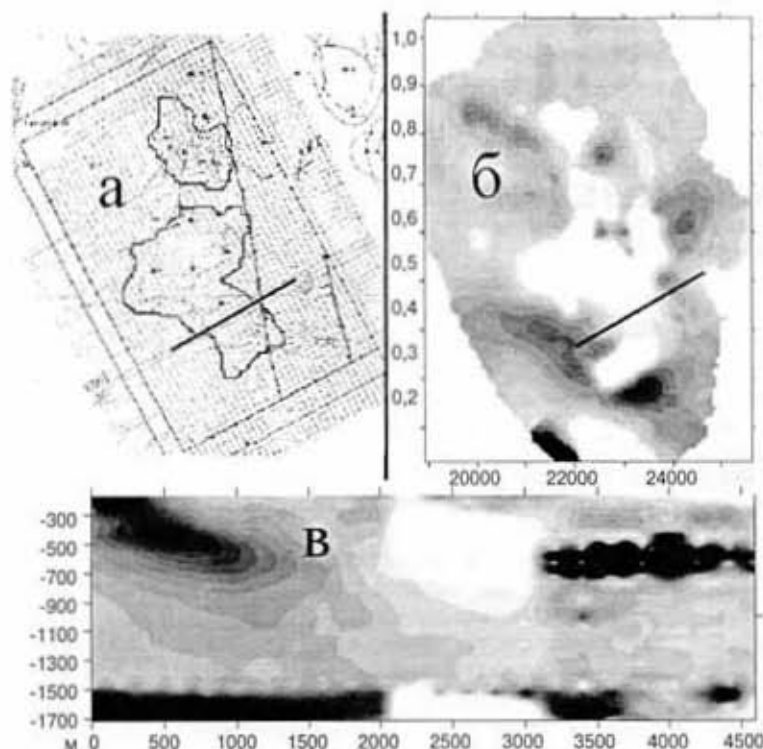


Рис. 5. Красноябрьская залежь:
а - предполагаемый контур залежи; б - площадной сигнал ЗВТ;
в - кажущийся разрез по профилю через залежь

Сейчас мы предьявим кратко лишь результат работ на Красноябрьской залежи нефти. На рис. 5 показаны предполагаемый контур залежи, полученный по разным данным (в основном сейсмическим), площадной сигнал ЗВТ на фиксированном времени (21 мс) и кажущийся разрез по профилю через залежь. На разрезе светлые зоны в центре соответствуют двум нефтеносным горизонтам. Хотелось бы обратить внимание читателя на то, что предлагаемые картинки отображают измеряемый в поле сигнал практически без какой-либо обработки.

Заключение

Цель этой публикации, однако, не состоит в представлении метода ЗВТ, который лишь частный случай применения переходного ТМ-процесса и установки КЭД. В данном контексте этот частный случай важен, разумеется, своей успешной-таки реализацией на практике и тем самым является веским доводом в пользу того подхода к проблемам электроразведки, который излагается в этой работе. В общем плане мы хотели бы сказать примерно следующее: желание специалистов в области геоэлектрики выявлять все более тонкие эффекты взаимодействия электромагнитного поля и "большой" геологической среды естественно и законно, так же как нежелание автора смириться с вытеснением электроразведки из структурных и нефтепоисковых работ. Но, по глубокому убеждению автора, удовлетворение этих устремлений можно получить, лишь отказавшись от индуктивной электроразведки (т. е. от использования поля магнитного типа), признав ее воз-

можности ограниченными и уже исчерпанными в принципиальном смысле. И кстати же, есть интереснейшая альтернатива в виде использования переменного поля электрического поля.

Поразительно, насколько мало исследованы свойства переменного (особенно устанавливающегося) ТМ-поля в прикладном электроразведочном аспекте. Поздние стадии, эквивалентность, роль токов смещения, роль формы токового импульса - эти и другие устоявшиеся понятия и феномены нестационарной и квазистационарной геоэлектрики с контролируруемыми источниками должны быть пересмотрены на случай, когда полное поле является полем чисто электрического типа. ТМ-поле минимизирует индукционный отклик (отсутствие магнитного и скоротечность электрического) одномерного распределения проводимости и в этой "тиши" создаются благоприятные условия для тонких экспериментов (изучения процессов ВП, например).

Интересными особенностями обладает и КЭД в качестве нового экспериментального средства в геоэлектромагнитных исследованиях: малая собственная индуктивность, способность пропускать большие токи (в зависимости от числа лучей), изотропность. Мы рассматривали его применение в "обычной электроразведке", однако несомненный интерес представляет его применение в малоуглубинной геоэлектрике и, напротив, использование в сверхмощных зондированиях (предполагая лучшие времена). Заметим, что сюжет и пафос нашей статьи связаны с одномерной горизонтально-слоистой геоэлектрической моделью среды. Если среда произвольная, то разделения на ТЕ- и ТМ-поля не происходит. Однако и в этом случае КЭД сохраняет свое значение как новый и своеобразный источник поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Могилатов В. С.: Патент РФ: Способ геоэлектроразведки: № 1062631: Опул. 23.12.83: Бюл. № 47.
2. Могилатов В. С., 1998, Возбуждение электромагнитного поля в слоистой Земле горизонтальным токовым листом: Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 5, 45 - 53.

ОБ АВТОРЕ

Владимир Сергеевич МОГИЛАТОВ



Ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института геофизики СО РАН, доктор технических наук. В 1968 г. окончил Новосибирский госуниверситет. Область научных интересов - физико-математические основания геоэлектрики с контролируемыми источниками. Автор 60 опубликованных работ.