Проблемы геоэлектроразведки и новый метод – зондирования вертикальными токами (ЗВТ) при поиске и разведке залежей углеводородов

Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО, Новосибирск, http://www.geozvt.ru/

1. Введение

Геофизика, так или иначе, использует все известные реальные физические поля (а псевдогеофизика использует даже и псевдофеномены - биоэнергетические, торсионные поля и пр.). Применение электромагнитного поля всегда вызывало большие ожидания. Ведь электромагнитные поля стали средством решения для человечества всех проблем коммуникации, навигации и локации разного рода объектов в воздушном и космическом пространствах. Именно электромагнитное поле позволяет увидеть нам яркую картинку с любой точки земного шара на экране телевизора. И мы желали бы увидеть таким же образом внутреннее строение Земли, посмотреть, что там, под нами. Почему нет?

Понятен даже и детям простой ответ – там темно, свет туда не проходит. Ну а частоты мобильной связи, «лучи» локаторов, сигналы радиостанций? Увы, истина сурова, только самые медленные электромагнитные поля проникают в эти глубины. Все дело в том, что Земля, а тем более морская вода, проводник электрического тока. Переменное электромагнитное поле, проникая в проводящую толщу, неизбежно (эти неумолимые уравнения Максвелла!) индуцирует электрический ток, который обращает энергию поля в тепло, и поле быстро умирает с глубиной. И чем быстрее меняется (имеет большую частоту) первичное электромагнитное поле, тем на меньшую глубину оно проникнет. Оперативная связь с погруженной подводной лодкой – большая проблема, если вы не знали об этом.

Мы вначале упоминали псевдополя, но более «реальная» псевдогеофизика с удовольствием использует и электромагнитное поле, обещая легко и быстро просканировать недра Земли (прямо с аэропланов!) локаторами и даже радарами и без затей указать все подземные сокровища! Не верьте подобным невеждам или, того хуже, мошенникам!

Так что серьезные глубинные электромагнитные зондирования Земли (если не используются природные медленные волны – магнитотеллурические) возможны только с применением мощных и больших возбуждающих установок-источников и напоминают скорее разогрев, передачу тепла и диффузию. Если речь идет о глубинах в километры, то периоды такого воздействия должны бы измеряться в секундах. Возбудив толщу пород до нужной глубины, мы неизбежно (увы, диффузия) возбуждаем и огромную окрестность вокруг точки зондирования. Измеряя отклик земной среды на это возбуждение (это вторая сторона процесса зондирования), мы в этом отклике имеем вклады от всех областей возбужденной среды. Так устроены традиционные методы электроразведки. Если целью зондирований является общее распределение проводимости, то эти методы прекрасно с этим справляются. Но если в этой толще, самой по себе уже известной и неинтересной, вы изучаете локальный «слабый» объект, то этот суммарный отклик, в котором «все» - серьезнейшая помеха. В этом слабость традиционных методов. Интуитивные представления геофизиков о богатстве взаимодействия сложного электромагнитного поля со сложной же геологической средой не оправдываются на практике. Фиксируемые результаты такого взаимодействия в традиционных методах электроразведки разочаровывающим образом общи и бедны. Эта неудовлетворенность прекрасно

отражается в сегодняшнем состоянии метода электроразведки. Реализованы уже тысячи различных методик и вариантов, предлагаются все новые. Упор делается на техническое совершенствование систем регистрации и рост мощности установок. Но основная проблема, на наш взгляд, не затрагивается – неэффективность экспериментальных схем, состоящая в том, что измеряется суммарный отклик.

2. В чем суть метода зондирования вертикальными токами (ЗВТ)

Итак, законы электродинамики не позволяют использовать нам высокие частоты в глубинных зондированиях Земли, и электроразведка, поэтому, уступила в историческом соревновании с сейсморазведкой (акустические поля), принципы которой описываются категориями геометрической оптики и позволяют детально описывать структуры. И что, история закончена? Нет, если взглянуть на проблему с другой стороны. Да мы не можем угнаться за сейсморазведкой в детальных структурных построениях. Но ведь сейсмика мало что рассказывает о вещественном составе среды. Связь с веществом посредством параметра скорости акустической волны является или слабой или крайне неоднозначной. Но электромагнитное поле – это совсем другое. Среда на самом деле – это заряженные частицы и электромагнитные поля, их связывающие. Поэтому взаимодействие внешнего электромагнитного поля и геологической среды и впрямь богатое и информативное. Только следы этого взаимодействия теряются в обобщенном отклике, который регистрируется в традиционных методах.

Что ж, мы не можем не «разогревать» большой объем (часто ненужный) среды. Такова природа нашего поля. Но мы можем попытаться по-иному организовать структуру этого возбуждения, и так, что отклик не содержит лишнего. Это можно сделать с помощью специального источника. Обычный источник – электрическая линия, заземленная по концам. Мы предлагаем использовать набор (до 8) таких линий, расположив их радиально и симметрично относительно центральной точки. Этакий паук, который отнюдь не сосет соки Земли, а, напротив, питает Землю сериями токовых импульсов (сейчас уже до 160 Ампер). Такой источник (круговой электрический диполь – КЭД) «закручивает» вторичные токи в тороидальную систему. Вы, может быть, помните из школьной физики, что тороидальная катушка не имеет магнитного поля вне себя. Вот и при таких зондированиях на поверхности Земли мы не имеем магнитного поля-отклика, если Земля «правильная», горизонтально-слоистая. С теоретической точки зрения речь идет об использовании поперечно-магнитной (ТМ) поляризации электромагнитного поля, это известно, мы только придумали наземный источник такого поля. Отклик появляется в случае какого-либо нарушения, наличия локального объекта (нефтяной залежи, например).

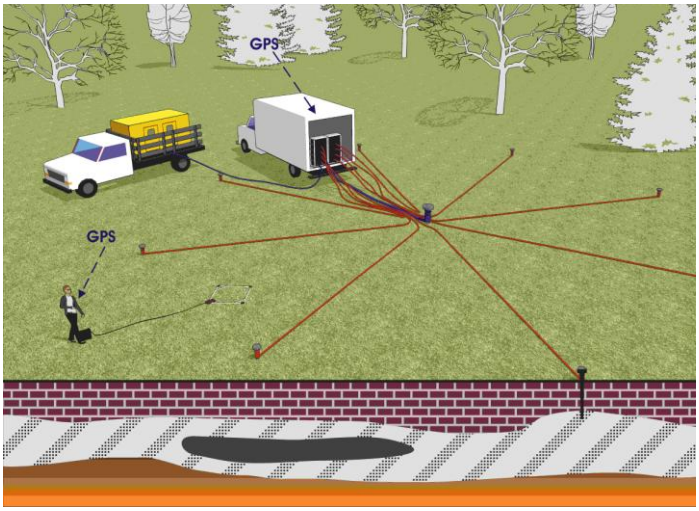

Рис.1

На рис.1 представлена схема нового метода (зондирования вертикальными токами – ЗВТ). Читатель должен понимать, что размер источника (радиус) может измеряться километрами, а площадь исследований в окрестностях источника – сотнями квадратных километров при глубине исследований до нескольких километров. Процесс исследований (или регистрации площадного сигнала, представленный на рисунке фигурой оператора у лежащего на земле датчика), включает оперативные измерения магнитного и электрического откликов несколькими (многими) группами операторов с применением средств передвижения, включая вертолеты (возможно, беспилотные).

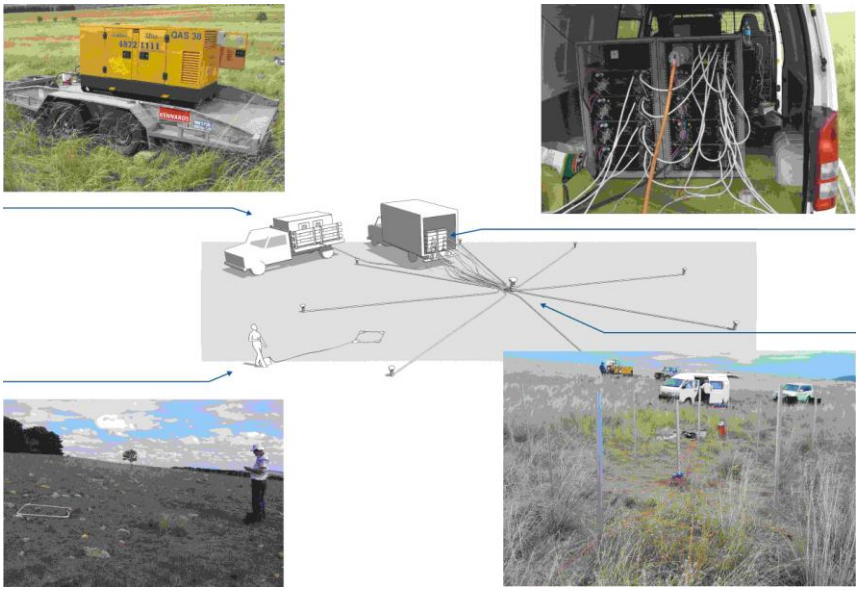

Рис.2

Применение такого источника (и метода) создает новую ситуацию в электроразведке. Широкие, но плотные площадные исследования при фиксированном мощном источнике, свободные от фонового, суммарного поля, дают возможность прослеживать тонкие латеральные изменения проводимости в георазрезе. Т.е. лучше решать традиционную задачу электроразведки. В принципе, это – несомненно, и не опровергается. Оппоненты лишь указывают на любимые электроразведочные «страшилки» - а не «метод ли это чистой аномалии», а влияние рельефа, а геологические помехи и т.д. Это забавно, потому что метод электроразведки, в котором рельеф (и геологическая помеха) «не влияет», без сомнения, просто груб.

Но большее значение такого метода в другом. Убрав фон, как мутное темное стекло, мы выявляем новые геоэлектрические эффекты, неизвестные в традиционных методах, или только подозреваемые там. Самым значительным, например, является четко выделяемый эффект «ореола» над залежами нефти, что позволяет говорить о прямых поисках углеводородов. Именно благодаря этому феномену мы успешно оконтурили ряд залежей в Татарстане и в других регионах мира.

3. С точки зрения теории

Основополагающий факт геоэлектрики, давно установленный теоретически, состоит в том, что электромагнитное поле в слоистой земле при произвольном возбуждении существует в виде суперпозиции двух фракций - полей магнитного (TE) и электрического (TM) типов. Вклад каждой из этих фракций в зависимости от режима работы и геометрии источника может быть различным вплоть до полного отсутствия.

Такое разделение - неформально, эти составляющие общего поля имеют различные пространственно-временные характеристики и физические свойства и свойства эти таковы, что нестационарное поле электрического типа обычно играет весьма незаметную роль в сравнении с полем магнитного типа. Ситуация усугублялась отсутствием практичных способов возбуждения нестационарного поля только электрического типа. Все это привело к тому, что **подавляющий объем исследований по нестационарной геоэлектрике в мире относится к проблемам взаимодействия геосреды и поля магнитного типа и, что самое печальное, зачастую без осознания односторонности и ограниченности таких исследований**. Эта ситуация, соответственно, поддерживается полевой практикой, в которой используются методы, основанные исключительно на применении поля магнитного типа. Эта односторонность, к сожалению, зафиксирована как неизбежная данность в российских и зарубежных монографиях и учебниках по электромагнитным методам.

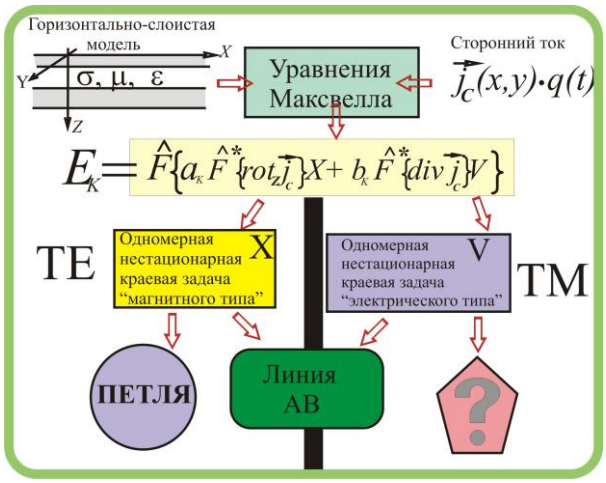

Рис.3

Между тем принципиальные возможности изучения геологической среды электромагнитными методами с использованием поля магнитного типа следует считать исчерпанными. Это связано с системой возбуждения токов в среде (только горизонтальные токи) и, как следствие, с основной и сильнейшей зависимостью поля лишь от одного геоэлектрического параметра - горизонтальной проводимости, причем, его весьма обобщенного распределения. На этом фоне проявления других параметров и тонкой структуры (к тому же, и возбуждаемых горизонтальными токами слабо) трудно уловимы. Можно сказать, что TE-поле - "тупой" инструмент геоэлектрических исследований. Альтернатива состоит в использовании поля электрического типа.

Вся эта теория и ситуация иллюстрируется на рис.3. Это никакая не новая теория, а лишь схема, правильно отражающая дуальную (TE-TM) природу геоэлектромагнитного поля. Она же прямо указывает на существование источника электромагнитного поля электрического типа, в некотором смысле симметричного старой доброй токовой петле. На схеме его место помечено знаком вопроса, но мы уже давно знаем ответ, и источник – круговой электрический диполь (КЭД) представлен ниже как абсолютно закономерная часть электроразведочной «триады» (рис.4).

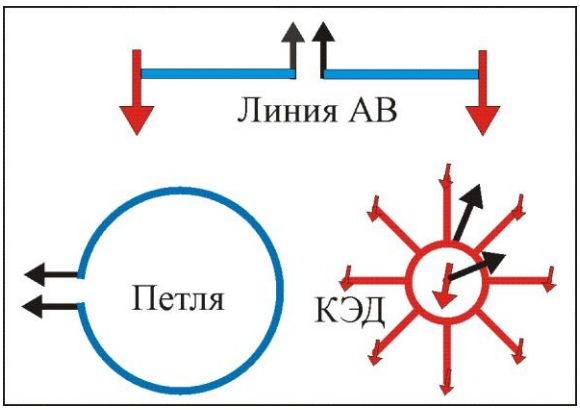

Рис.4

Интересно, что КЭД, с другой стороны, можно рассматривать как наземный аналог вертикальной электрической линии, размещаемой в скважине или в море. Оба эти источники возбуждают поле электрического (TM) типа. Однако, по нескольким причинам, вертикальная линия – малопригодный источник, тогда как применение КЭД открывает новое направление в контролируемой геоэлектрике. Создаваемая им особая конфигурация вторичного тока с участием вертикальной компоненты тока – тороидальная система (рис.5) обладает совершенно феноменальными свойствами, неизвестными и невозможными в традиционных зондированиях становлением (ЗС).

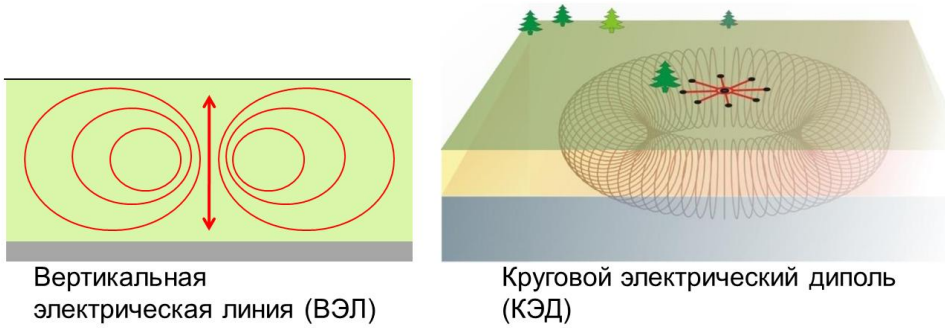

Рис.5

4. Аппаратура

Основная особенность аппаратуры метода зондирований вертикальными токами по сравнению с традиционными методами ЗС состоит в наличии системы синхронного обеспечения радиальных питающих линий (8 линий) равными токами в импульсном режиме с накоплением. Это оказалась сложной проблемой ввиду разнообразных условий заземления и нестабильности самих заземлений во время работы. За 15 лет система трижды уже разрабатывалась заново, и третье поколение силовой части аппаратуры ЗВТ, которое используется сейчас, вобрало в себя солидный полевой опыт и может обеспечивать до 160 А тока в КЭД. К сожалению, до сих пор не отделился слаботочный

портативный вариант для рудных работ, что упростило бы оба варианта. В настоящее время имеется три новых комплекта силовой аппаратуры ЗВТ.

<u>Зондирующая установка «GTE-10S»</u> (рис.6)

Рис.6

формирует в круговом электрическом диполе стабилизированные импульсы тока заданной амплитуды и длительности с чередующейся полярностью. Имеет следующие характеристики:
- восемь каналов;
- выходное напряжение от 50 до 750 В (три диапазона 50-250В, 150-500В, 300-750В);
- диапазон выходного тока от 8 до 160 А;
- стабильность тока ±1%;
- максимальная входная мощность 80 кВт;
- питание от электрогенератора трехфазного переменного напряжения 380/220 В с изолированной нейтралью мощностью не менее 100 кВт;
- синхронизация от GPS;
- масса 300 кг, габаритные размеры – две стойки 550 х 500 х 940 мм;
- защита от перегрузки и перегрева;
- индикация и запись в файл напряжения питания, потребляемого тока и мощности по каждой фазе и суммарной мощности, выхода из режима стабилизации;
- непрерывный контроль сопротивления изоляции цепей питания.

Измерительный комплекс (один или несколько) состоит из измерителя и датчика.

<u>Измеритель «CEI-7»</u> (рис.7)

Рис.7

известен, прежде всего, как измеритель для традиционных методов ЗС. Для метода ЗВТ он обладает некоторой избыточностью, но мы его используем для сохранения универсальности аппаратуры ЗВТ. Отличается компактностью и высокой точностью измерений. Перед каждым циклом измерений выполняет тестовые калибровочные измерения позволяющие определить работоспособность измерителя, а также компенсировать температурные и временные изменения переходной характеристики измерительного тракта. Каждый цикл измерений начинается с предварительного измерения, в котором определяются параметры входного сигнала. По предварительно измеренному входному сигналу управляющая программа выбирает оптимальные параметры измерения. Результат интегрирования на определенном временном интервале кодируется АЦП и считывается микроконтроллером. Пользователь может выбрать густоту шкалы – от 4 до 80 точек на декаду.

Дальнейшие преобразования сигнала производятся в компьютере, в который микроконтроллер передает данные по одному из интерфейсов. Пользователь в зависимости от имеющегося компьютера выбирает один из 3-х интерфейсов – RS232, USB, или беспроводный Blue Tooth, который наиболее подходит в случае использования наладонного компьютера.

Для варианта с удаленным управлением измерителя существует вариант модемной связи. В этом случае возможно проведение работ с удалением от управляющего компьютера до 1 км. Модемный интерфейс также используется для многоканальных измерений, когда измерительные комплексы удалены от управляющего компьютера.

Многоканальный интерфейс позволяет одновременно выполнять измерения пятью измерительными комплексами.

Синхронизация работы измерителя с силовой частью аппаратуры ЗВТ, а также и привязка измерений на местности, производятся с использованием GPS.

Управляющая программа измерителя работает в среде Windows.

<u>Приемные индукционные (импульсные) датчики «ПДИ»</u> (рис.8)

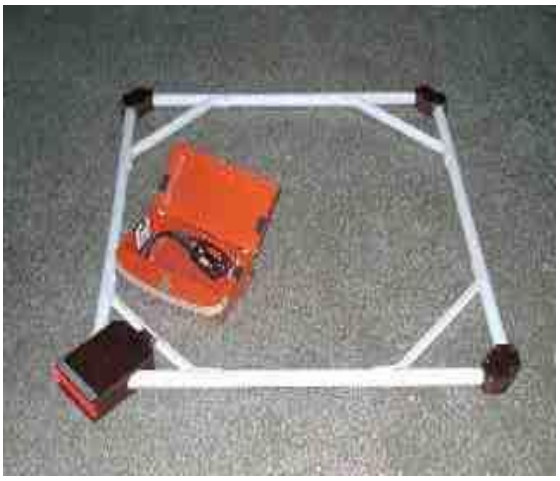

Рис.8

Датчик содержит многовитковую приемную рамку и малошумящий предусилитель с автономной системой электропитания. Разработано несколько вариантов рамок, определяющих модификацию датчика. Предусилитель расположен внутри конструкции

рамки, причем, конструкция предусилителя одинакова для всех типов датчиков с различными эффективными моментами – до 500 000 м^2.

Следует отметить, что аппаратура ЗВТ и конфигурация КЭД образуют весьма гибкую электроразведочную систему, позволяющую в процессе работ оперативно делать, кроме собственно ЗВТ, геоэлектрические измерения другими, более традиционными методами ЗС. А также быстро реализовывать различные новации по части электроразведочных источников. Например, мы успешно применили на практике установку «встречные линии» (АВА) – интереснейшее усовершенствование традиционной линии АВ, позволяющее сохранить мобильность линии АВ и позаимствовать в серьезной мере от КЭД его уникальные качества ТМ-возбудителя.

Еще одно замечание касается воспроизводства аппаратуры ЗВТ. До сих пор соавторы и разработчики аппаратурно-методического комплекса ЗВТ своими силами создавали аппаратуру и участвовали в полевых работах ЗВТ или курировали их. Сегодня мы готовы передавать всю технологию ЗВТ производственным организациям и способны наладить производство аппаратуры малыми сериями.

5. Зачем это нужно?

Представив выше метод и аппаратуру ЗВТ, довольно сложные по электроразведочным понятиям, мы хотели бы снова объяснить, зачем это нужно. Мы вполне привыкли к реакции «нормальных» электроразведчиков (среди которых немало наших личных друзей) на предложение ЗВТ и КЭД как на искусственную, нежизнеспособную затею. Ну, и куда вы в поле с этим «пауком», там и так проблем хватает! К сожалению, эта боязнь проблем отражает крайне скромное положение электроразведки в современном геофизическом исследовании. Скромные расходы, скромные результаты. Но мы вовсе не предлагаем лучше решать традиционные задачи электроразведки (хотя способны на это), мы предлагаем решать новые задачи, играть на новом уровне, где игра стоит свеч. Мы предлагаем оценивать сейсмические объекты на предмет наличия углеводородов, оконтурить залежи, находить зоны повышенного содержания углеводородов внутри контура и, наконец, определять порядок бурения.

Попытки вновь и вновь применять традиционную (индуктивную) импульсную электроразведку в сильнопроводящих средах (Западная Сибирь, море) только дискредитируют электроразведочный метод. В методе ЗВТ (НЕиндуктивная импульсная электроразведка) отклик от проводящей толщи компенсируется на физическом уровне, и мы способны регистрировать сигналы, определяемые не только параметром проводимости. В частности, «видеть» ореолы углеводородов, и как следствие, успешно работать в условиях больших проводимостей.

6. Результаты

ЗВТ довольно широко опробован на рудных и нефтегазовых объектах. В Татарстане уже несколько лет результаты ЗВТ принимаются геофизиками и геологами в качестве данных для уточнения зон распространения углеводородов. Велик интерес к методу и за рубежом. Мы побывали с методом даже в Австралии, где определяли рудное месторождение, и в других странах, при использовании ЗВТ для поиска рудных и нефтяных месторождений (Финляндия, Италия, США). Метод привлекался (2010г.) для участия в экологическом проекте в США (штат Вайоминг) в целях мониторинга закачки углерода под землю. В настоящее время готовится ряд проектов для широкого внедрения ЗВТ. На метод ЗВТ получены 6 российских патентов и 2 патента США.

Метод ЗВТ-М задумывался как радикальное средство подавления отклика от вмещающей среды и фиксации в этих условиях аномального магнитного поля от аномальных вторичных токов в локальном объекте. Предполагалось, что непосредственно регистрируемое по площади аномальное поле очень тесно связано со структурой неоднородности, и площадной сигнал будет обладать высокими визуализирующими свойствами. В случае рудного применения это вполне себя оправдало. Рудные работ были проведены в Норильском районе, на Камчатке, в Австралии и в Финляндии, и дали весьма определенные положительные результаты. На рис.9 на примере работ под городом Каустинен (Западная Финляндия, 2009г.), в которых объектом поисков являлось месторождение лития, иллюстрируется вышесказанное. Трехмерный куб полевых данных (XYt) трансформируется в куб XYZ (время трансформируется в глубину), и на рис.9.2 мы видим кажущийся объект. К моменту этих работ мы уже имели в своем распоряжении программу трехмерного моделирования и подобрали объект, создающий сигнал (XYt), близкий к полевому кубу данных (рис.9.3). Наконец, на рис.9.4 приведен кажущийся объект, построенный по синтетическим данным. Все три объекта локализованы практически в одном месте. И оказывается, что кажущийся объект (рис.9.2), полученный по полевым данным (с минимальным предпроцессингом), вполне являет собой результат. Его можно было получить уже в поле, к моменту окончания работ, и можно сказать, что мы увидели объект прямо в поле.

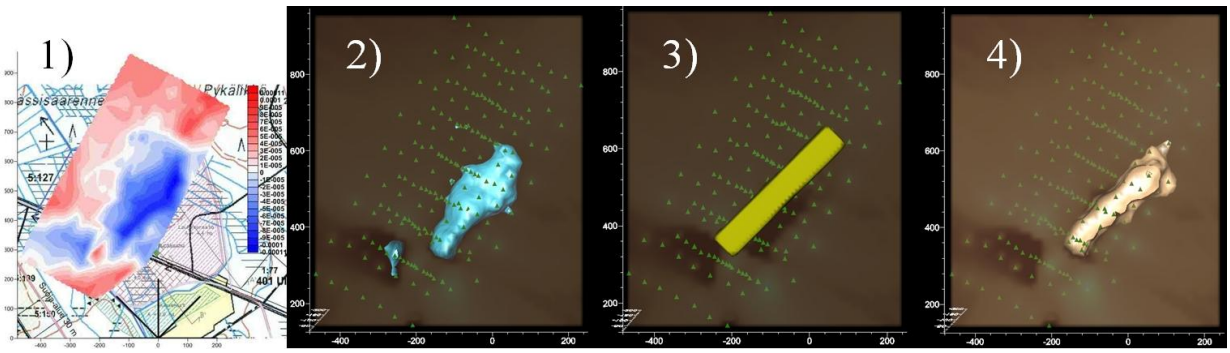

Рис.9. Рудные работы в Финляндии. 1) полевой площадной сигнал ЗВТ-М на времени 21мс; 2) кажущийся 3D-объект; 3) подобранный в результате 3D-моделирования объект: 4) кажущийся объект по синтетическим данным

Однако при нефтепоисковом применении ЗВТ с индуктивным магнитным приемом (ЗВТ-М) обнаружился довольно непонятный, хотя и крайне благоприятный экспериментальный факт. В целом ряде работ (последние – в 2011) залежи нефти проявляют себя в площадном сигнале ЗВТ областью повышенных значений ЭДС одного знака (измерения dB_z/dt индуктивным датчиком). Контур отмечался сменой знака. На рис. 10 представлены некоторые результаты. Площадной сигнал ЗВТ своим рельефом (красные зоны – положительные значения сигналов) указывает на залежи и сопутствующие им зоны миграции углеводородов. Эти результаты верифицированы сопоставлением с другими методами (особенно интересно – с данными геохимических исследований на поверхности), а также с существующим и последующим бурением.

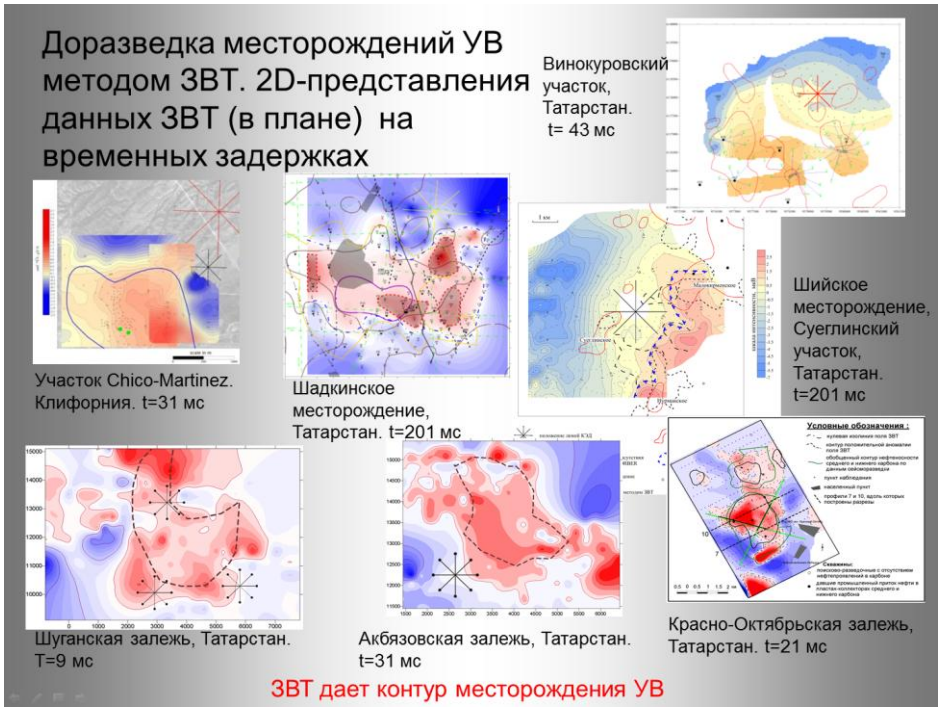

Рис.10

Такой результат сам по себе зачастую устраивал заказчиков, но, конечно, нуждался в объяснении и дальнейшей интерпретации. В результате многолетних упорных попыток в этом направлении с применением трехмерного моделирования удалось установить:

1) отклик генерируется не самой залежью, а вертикально протяженной областью среды над залежью – ореолом, что хорошо видно на кажущихся разрезах;
2) даже сложные модели распределения проводимости в залежи и ореоле не объясняют (устойчивый, в большом диапазоне времен) однополярный сигнал над ореолом;
3) представление ореола зоной аномальных значений параметров ВП (в модели Cole-Cole) также приводит к двуполярному сигналу над ореолом;
4) «не проходит» и модель с магнитными свойствами – снова двуполярный сигнал.

Собственно, анализ площадных сигналов показывает, что ореол в процессе становления приобретает магнитный момент, «намагничивается» в вертикальном (или близком к этому) направлении. Это очень тонкий эффект, природа которого только еще проясняется (по-видимому, важную роль в нем играет и магнитное поле Земли). Можем пока сказать, что он в высокой степени связан с вещественным составом среды и позволяет считать его использование прямым методом поиска углеводородов. Во всяком случае, он помог подтвердить или отвергнуть перспективность некоторых объектов (поднятий), предлагаемых сейсмикой. И мы констатируем, что теперь электроразведка в лице ЗВТ, вовсе не конкурируя с сейсморазведкой, в то же время очень существенно дополняет ее информацией о вещественном составе среды, в частности, о наличии и распространении даже слабых следов углеводородов.

Поясним подробнее некоторые из приведенных на рис.10 примеров. На рис.11 представлены результаты давних (2000-2001гг.) работ на Красно-Октябрьском месторождении (р. Татарстан). Эти работы производились казанскими геофизиками самостоятельно при нашем участии в обработке.

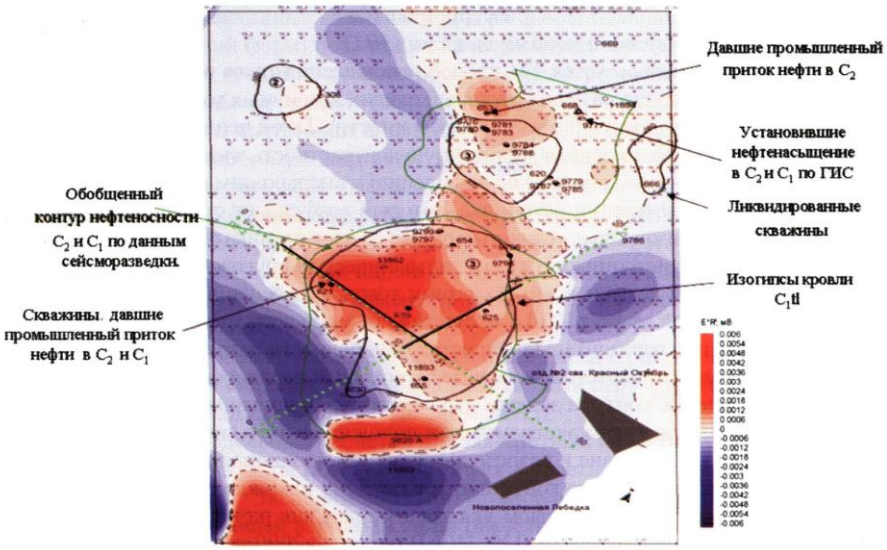

Рис.11

В этих давних работах использовалась старая аппаратура, которая обеспечивала только до 4 А в луч. Глубинность ограничивалась первыми сотнями метров, т.е. далеко не достигала нефтеносных горизонтов. Тем не менее, была получена площадная аномалия (красный цвет), которая хорошо согласовывалась с другими данными о нефтенасыщении, а в последствии подтвердилась бурением (рисунок взят из книги Хисамов Р.С. и др. Геологические работы в регионах с высокой опоискованностью недр // Казань: Издательство "Фэн" Академии наук РТ, 2000).

Выделим из ряда работ пример с Винокуровским участком (рис.12). Эти работы позволили забраковать 7 локальных сейсмических поднятий

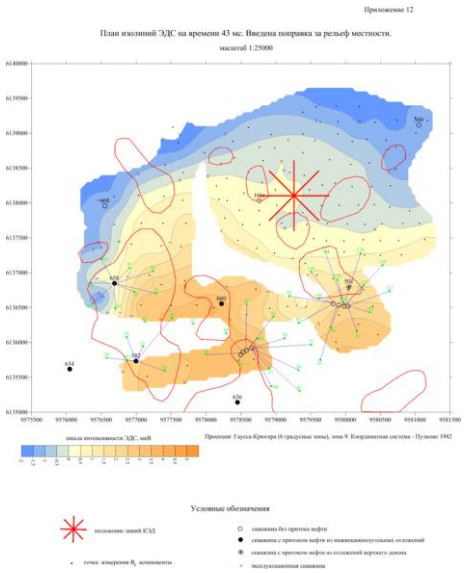

Рис.12

В 2008 году в пределах Шадкинской структуры, выявленной сейсморазведочными работами, пробурена скважина глубокого бурения № 635, давшая промышленный приток нефти из терригенных отложений тиманского горизонта верхнего девона. Последующее уточнение структурного плана Шадкинского поднятия с учетом результатов бурения показало, что скважина находится не в оптимальных условиях. Возникла проблема, в каком направлении планировать дальнейшее бурение скважин.

Электроразведочные исследования методом зондирований вертикальными токами были направлены на оконтуривание нефтяной залежи. В качестве источника электромагнитного поля использовался круговой электрический диполь с длиной лучей 1 км, ток поддерживался генераторной установкой на уровне 112 А. Для решения поставленных геологических задач были выполнены электроразведочные работы по редкой сети профилей в объеме 203 ф.т. на площади примерно равной 40 км^2.

По результатам обработки электроразведочных исследований методом ЗВТ (рис.13) получен контур нефтяной залежи, который позволил уточнить прогноз сделанный на основе сейсморазведочных работ. На рисунке показано отображение сигнала ЗВТ на времени 201 мс, что соответствует глубине исследования примерно 1600 м (глубина залегания коллекторов верхнего девона). В пределах положительной аномалии сигналов выделены зоны с максимальными значениями $\partial B_z / \partial t$, являющиеся наиболее перспективными в нефтеносном отношении.

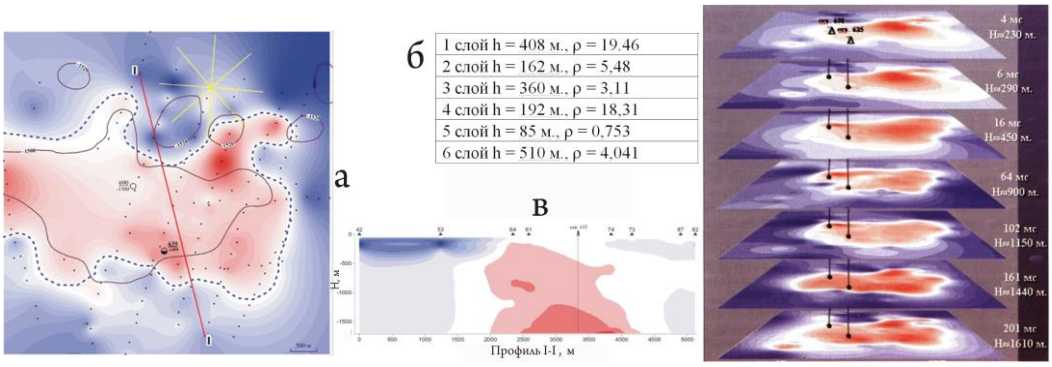

Рис.13

На рис.13 представлен также кажущийся разрез по одному из профилей. Пространственно-временная положительная аномалия сигнала ЗВТ отражает ореол измененных под действием миграции углеводородов пород. С увеличением глубины зондирования аномалия, обусловленная ореолом, смещается по горизонтали и достигает Шадкинского сейсмического поднятия терригенных отложений верхнего девона, которые являются нефтяными коллекторами. Мы получили интересное подтверждение нашим результатам. Здесь были проведены геохимические работы, и площадная геохимическая аномалия GORE SORBER оказалась весьма близка к аномалии, полученной зондированиями вертикальными токами. Прослеженный нами ореол вышел на дневную поверхность! Итак, можно характеризовать методику ЗВТ как прямой способ поиска залежей углеводородов, позволяющий фиксировать сигнал от ореольных изменений над залежью.

Итак, применение ЗВТ позволяет повысить эффективность разведочного бурения. Как минимум, треть скважин бурится впустую. Кроме того надо считать, что каждая пробуренная скважина наносит значительный ущерб окружающей среде. Напрашивается вопрос о включении ЗВТ в комплекс поисковых и разведочных работ предшествующих бурению. Эффект регистрации так называемых «ореолов» над залежью позволяет говорить о прямых поисках углеводородов. Применение ЗВТ в комплексе разведочных работ уменьшит ущерб, наносимый окружающей среде. Учитывая высокую стоимость сейсмических работ, возможно применение ЗВТ на первом этапе поисковых работ, например, в комплексе с геохимией.

7. Проекты

Дальнейшее развитие метода видится в совершенствовании интерпретационного программного обеспечения, в создании более мощных зондирующих установок, которые позволят с одной точки зондирования опоисковывать более 400 кв.км, в развитии системы площадных наблюдений (например, регистрация сигналов с летательного аппарата, рис.14).

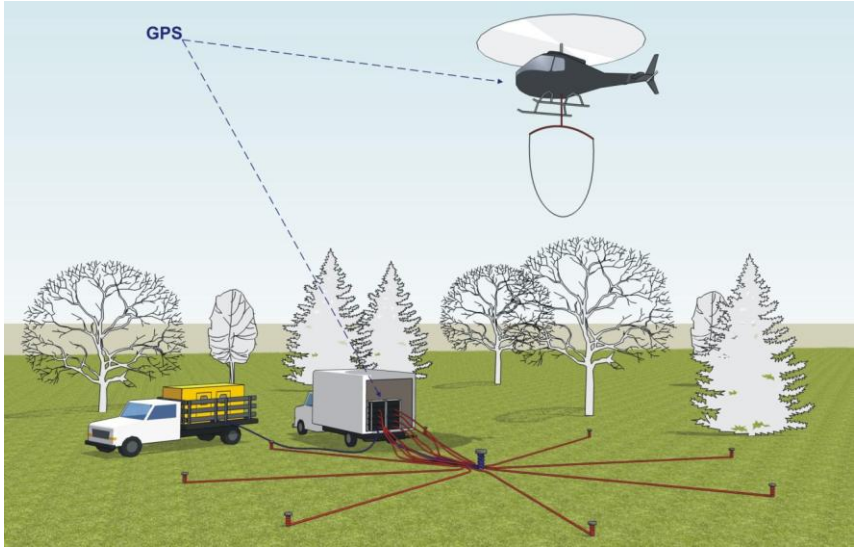

Рис.14

Очень интересны перспективы метода в морских условиях (рис.15), где он радикально решает извечную проблему морской электроразведки – экранирующее действие слоя морской воды. Проблема решается именно применением ТМ-поляризованного поля. Кстати, довольно редкий пример эффективности традиционной электроразведки в море, когда в глубоком море (более 1 км) погруженная установка *ABMN* (метод CSEM) регистрирует феноменальный аномальный эффект от тонкого высокоомного включения, возникает за счет поглощения морской водой индуктивной составляющей (ТЕ-поляризованной), определяющей суммарный сигнал в наземном варианте. Однако используются огромные разносы (>10 км), и о детальности в плане и речи нет.

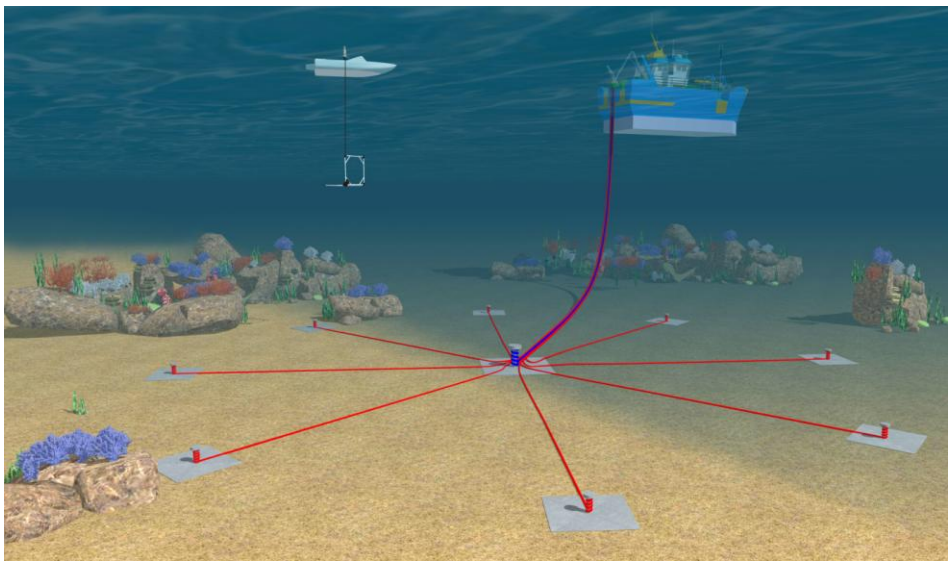

Рис.15

Наше предложение в этом случае воспринимается зачастую с недоумением: ведь лейтмотив сегодняшней морской электроразведки – работа в движении. Но мы снова говорим – мы решаем совсем другие задачи. Да вы быстро, профильными работами выявляете объект. Мы же даем контур этого объекта и указываем направление бурения. Оптимизировать бурение в море – за это многим можно заплатить, в том числе, и раскладкой сложной установки на морском дне.

Арктический проект

Изучение, а затем и освоение минеральных ресурсов арктического бассейна стоит на повестке человеческой цивилизации. Не все в восторге от этой перспективы, но это объективная необходимость, возникающая из роста населения Земли и исчерпания известных ресурсов. Вопрос этот крайне важный, и имеет даже геополитические измерения. Законная активность России (самого большого естественного претендента на арктический бассейн) вызвала в недавнее время большие волнения и даже некоторое раздражение. Мировое сообщество будет как-то регулировать правовые формы использования ресурсов Арктики, но неизбежно будет при этом учитываться реальная деятельность по изучению и освоению этих ресурсов. Здесь есть еще один аспект – ресурсы (например, нефть), разведанные и добытые в Арктике, являются высокотехнологичным продуктом, что бы там не говорилось о статусе нашей страны как сырьевого придатка мировой экономики. Такая добыча стимулирует развитие наукоемких отраслей промышленности так же, как это свойственно производству новой военной техники и космической деятельности.

Основная, принципиальная проблема, которую приходится решать при проектировании геолого-геофизического исследования в Арктике состоит в том, что объект покрыт довольно глубоким морем (до 5 км) всюду и, на значительной части, еще и вечными льдами. Такая «двойная» упаковка сразу исключает длинный ряд наземных технологий, дистанционные исследования с летательных аппаратов и спутников, но также и многие наработки морской геофизики. Что же остается? Невероятно дорогая и проблематичная в этих условиях сейсморазведка? Малоэффективные гравиметрические и магнитометрические исследования? Электромагнитные зондирования? Электромагнитные исследования с использованием естественных полей могут сохранить свое значение. Но они не обладают необходимой детальностью. Нужны активные методы. Однако традиционные методы электромагнитных зондирований с искусственными источниками направлены на изучение общего распределения параметра сопротивления в геологической среде и становятся неэффективными при наличии такого мощного проводящего экрана как слой морской воды. Льды также делают невозможным применение некоторых морских технологий (таких как CSEM), которые все же претендуют на некоторую эффективность в море.

Мы предлагаем здесь совершенно особую технологию электромагнитных зондирований, основанную на возбуждении особой поляризации электромагнитного поля, что с технической стороны обеспечивается применение особого же источника поля (круговой электрический диполь – КЭД). Эта технология (зондирования вертикальными токами – ЗВТ) позволяет фиксировать тонкие аномальные эффекты в отклике за счет глубокой компенсации на физическом уровне общего проводящего фона геоэлектрического разреза, в том числе и слоя морской воды.

Характерной особенностью ЗВТ является используемый, весьма сложный с традиционной точки зрения, источник поля. Но кажется, что эта неизбежная плата за высокую эффективность превращается в совершенно неподъемную в условиях Арктики. Как вообще перемещать такую установку для покрытия площади или профиля во льдах? Но тут мы предлагаем вторую сторону нашего проекта – использование известного

дрейфа льдов. Таким образом, предусматривается однажды разместить сложную, масштабную электроразведочную питающую и, частично, приемную конфигурации на дрейфующем льду, и в течении долгого времени повторять реализацию системы наблюдения, подразумевая перемещение всей установки относительно дна арктического бассейна. Можно тут сослаться на опыт советских дрейфующих станций СП. Вот, например, справка по станции *Северный полюс-8 (СП-8) - советская научно-исследовательская дрейфующая станция. Открыта 19 апреля 1959 года. Работа на станции проводилась в три смены. 1-я смена в составе 20 человек с 19 апреля 1959 года по 3 апреля 1960 года (354 дня). 2-я смена в составе 18 человек с 3 апреля 1960 года по 15 апреля 1961 года (377 дней). 3-я смена в составе 19 человек с 15 апреля 1961 года по 19 марта 1962 года (338 дней). Станция была эвакуирована по причине разлома дрейфующей льдины, проработав в общей сложности 1069 дней и продрейфовав 5976 километров в Северном Ледовитом Океане.*

На рис.16 показана схема дрейфа льдов Арктики:

Рис.16

Собственно, мы продолжили бы традицию станций СП, дополнив электромагнитные зондирования наблюдениями за другими геофизическими полями на новой научно-технической базе. Весьма полезны были бы и магнитотеллурические исследования.

Итак, мы предлагаем следующую методику электромагнитных зондирований придонной геологической среды глубиной до нескольких километров с целью определения распределения удельного сопротивления, а также других геоэлектрических параметров, что выявит различные региональные и локальные геологические объекты при перемещении всей экспериментальной установки в пределах арктического бассейна. На льду (рис.17) располагается (один раз и очень тщательно) питающая в импульсном режиме установка кругового электрического диполя. Установка заземляется в центре и по концам радиальных питающих линий через отверстия во льду. Электроды заземлений могут быть глубоко погружены в море.

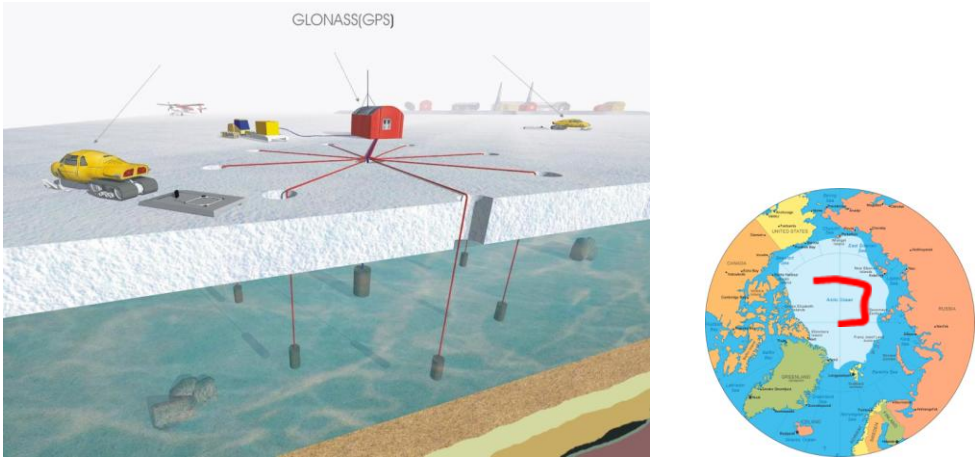

Рис.17. Общий вид питающей установки на арктическом льду и возможная область исследований

Радиус КЭД (длина радиальной линии) может достигать 10-20 км (вопрос подлежит изучению). Система наблюдения складывается из электрических приемников в виде фиксированных, заземленных в воде, горизонтальных и вертикальных линий, а также из площадной, оперативно выполняемой мобильными индуктивными датчиками системы измерений магнитного поля. Здесь намечается альтернатива – делать ли непрерывные измерения (что едва ли возможно), или же проводить цикл измерений, привязывать его к определенной точке, и повторять его через некоторое время (сутки – это 5-7 км дрейфа). Этот вопрос предстоит изучить. Так или иначе, исходя из опыта работ методом ЗВТ, измерениями может быть охвачена полоса вдоль траектории источника шириной в десять радиусов. Итак, исходя из радиуса КЭД 15 км, мы получаем при общей длине дрейфа в 4000 км (средний показатель по советским СП) 60 000 кв.км обследованной площади в виде, что интересно, весьма вытянутого извилистого коридора (см. рис.17).

Обращаем внимание, что описанный геофизический эксперимент при учете опыта советских СП выглядит весьма реалистично и не слишком затратно (учитывая также дополнительные, разнообразные геофизические исследования, кроме основного электромагнитного зондирования). Вопрос вызывает только регулярное снабжение энергоресурсами. Подвоз авиатранспортом ГСМ для электрогенераторов не выглядит хорошим решением. Возможно, нужно рассмотреть (при прерывном режиме работ) питание от аккумуляторных батарей с подзарядкой в периоды пауз от ветрогенераторов. Или, может быть, целесообразна доставка и установка компактного ядерного реактора (конечно, в непотопляемом и неразрушаемом исполнении). Надо также заметить, что такие зондирования, с такой статичной, фиксированной приемно-питающей установкой, с идеально сохраняемыми параметрами обеспечат высочайшее качество измерений и не потребуют большого накопления сигнала, что будет также поддержано также малым уровнем электромагнитных помех в тех широтах.

8. Литература

Вопросы метода ЗВТ и нового источника КЭД имеют уже обширную публикацию. В основном, при участии авторов метода, но не только. Здесь приводятся основные работы. Список можно было бы дополнить докладами на российских и международных конференциях, а также патентами – российскими и США, из которых первый (на КЭД) был получен еще в 1982 году.

1. Могилатов В.С. Круговой электрический диполь - новый источник для электроразведки // Изв.РАН. Сер.:Физика Земли.- 1992.- N 6.- с 97-105.
2. Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирования вертикальными токами (ЗВТ) // Изв.РАН. Сер.:Физика Земли.- 1994.-N 6.- с 73-79.
3. Могилатов В.С.,Злобинский А.В. Поле кругового электрического диполя (КЭД) при постоянном токе // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли. - 1995. - N 11. - с 25-29.
4. Могилатов В.С. Теоретический анализ возможностей зондирований вертикальными токами (ЗВТ). // Геология и геофизика.-1996. - Том 37, N 7. - с.112-119.
5. Балашов Б.П., Могилатов В.С. О разработке аппаратурного комплекса электроразведочной системы зондирования вертикальными токами. // Геофизика. - 1996. - N 3. - с 30-33.
6. Mogilatov V., 1996, Exitation of a half-space by a radial current sheet source: Pure and applied geophysics. - Vol. 147, No.4. pp.763-775.
7. Mogilatov V. and Balashov B., 1996, A new method of geoelectrical prospecting by vertical electric current soundings: Jornal of applied geophysics. - Vol. 36. pp.31-41.
8. Могилатов В.С. Нестационарное поле кругового электрического диполя в однородной Земле. // Геология и геофизика. - 1997, т.38, N 11. С. 1849-1855.
9. Могилатов В.С. Индуктивный, смешанный и гальванический источники в электроразведке становлением поля. // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1997.- N 12. - с.42-51.
10. Могилатов В.С. Возбуждение электромагнитного поля в слоистой Земле горизонтальным токовым листом. // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1998. - N 5. - С. 45-53.
11. Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирование вертикальными токами - качественный шаг в развитии индукционной электроразведки. //Разведочная геофизика. - 1998. - выпуск 4. - 60 с.
12. Хисамов Р.С., Гатиятуллин Н.С., Тарасов Е.А., Екименко В.А., Войтович С.Е., Либерман В.Б. Геологические работы в регионах с высокой опоискованностью недр // Казань: Издательство "Фэн" Академии наук РТ, 2000, - 274 с.
13. Могилатов В.С. Альтернативы в электроразведке // Геофизика.-2003.- N 3. - С.30-39.
14. Могилатов В.С., Мухамадиев Р.С., Балашов Б.П., Потапов В.В., Смоленцев В.В., Феофилов С.А., Темирбулатов Ш.С. Результаты работ по оконтуриванию залежей нефти в Татарстане методом ЗВТ // Геофизика.-2003.- N 5. - С.47-54.
15. Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирования вертикальными токами. - Новосибирск: Изд. СО РАН, 2005. - 207с.
16. Могилатов В.С., Потапов В.В. Возбуждение полей в геоэлектрических экспериментах // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли. - 2007г. - №5. - С. 88-99.
17. Mogilatov V.,Mukhopadhyay P. and Mallick S. 2009. An advanced deep penetrating EM technique for hydrocarbon and mineral exploration: mVECS // NGF Abstracts and Prceedings, No 3, 2009. pp. 21-24.
18. Могилатов В.С., Балашов Б.П., Потапов В.В. Методы нестационарного тм-поля в геоэлектрике с контролируемым источником. Проблемы и результаты // Геофизический журнал. - 2009. Том 31, №4. - С.163-167.
19. Злобинский А.В., Квашнин К.А., Могилатов В.С. Электроразведка методом ЗВТ. Рудные работы в Финляндии // Геофизика.-2010.- N 6. - С.53-57.
20. Балашов Б.П., Мухамадиев Р.С., Могилатов В.С., Андреев Д.С., Злобинский А.В., Шишкин В.К., Стогний В.В. Оконтуривание залежей углеводородов зондированиями вертикальными токами // Геофизика.-2011.- N 1. - С.61-66.
21. Балашов Б.П., Могилатов В.С. Зондирования вертикальными токами - перспективный метод электроразведки на нефть и газ // Аналитический журнал Нефтесервис. -2011. -Т 1(13). - С.46-49.