

## Электроразведка на нефть и газ

### Мистер Констебла, как магнитом, тянет к морским электромагнитным методам

Constable's magnetic attraction to the marine EM business

**Профессор Стивен Констебл (Steven Constable) из Института Скриппса (Scripps Institution), один из пионеров применения ЭМЗ на море, подобно многим, удивлен быстрым ростом применения морских ЗС-ЗИ в нефтегазовой отрасли. Он рассказал Эндрю МакБарнету (Andrew McBarnet) о своих работах в этой области с начала 1980-х.**

Професор Стивен Констебл из Океанографического Института Скриппса (Scripps Institution of Oceanography, SIO) при Университете штата Калифорния в Сан-Диего (University of California, San Diego, UCSD) не знал, с чем связывается, когда, став PhD, начал в 1982 г. работать в SIO.

Это было началом деятельности, которая определила, пусть неявно, сегодняшний взлет применения ЭМЗ при поисках углеводородов в глубоководной обстановке.

Как многое в жизни, занятия Констебла методами переменного тока были скорее случайностью, чем осознанным выбором. Он родился в Великобритании; когда ему было девять лет, семья переехала в Австралию по программе иммиграции. Учился Констебл, по-видимому, хорошо, и получил степень бакалавра геологии в Университете Западной Австралии, а затем перешел в Национальный университет Австралии (National University of Australia) в Канберре, где собирался писать диссертацию по палеомагнетизму. Именно тогда в первый раз вмешался рок. «Мой научный руководитель Майк МакЭлхинни (Mike McElhinney) сказал, что палеомагнитчику трудно найти работу, поэтому не заняться ли электрическими зондированиями».

Он успешно защитил диссертацию по геофизике, посвященную электрическим зондированиям. Пока он после этого искал работу, его коллега побывал на семинаре по ЭМ методам в пров. Виктория, Канада, и рассказал, что видел объявление, что проф. «Чип» Кокс ('Chip' Cox) из Океанографического института Скриппса приглашает свежезашитившегося PhD. «Я никогда не слышал про Чипа», вспоминает Констебл, «но про сам Институт слышал». Он подал заявление в Институт; его приняли, и он поехал туда, предпочтя Институт Скриппса предложениям из Канады от проф. Найджела Эдвардса (Nigel Edwards) из Университета Торонто и от проф. Яна Гуфа (Ian Gough) из Университета Эдмонтонса. Выбор был сделан из-за жены Кэти, которая могла бы продолжить в Институте Скриппса работу над диссертацией (сейчас она тоже профессор этого Института, работает в области геомагнетизма, а иногда – в совместных с мужем проектах). «Мы были молоды и решили, что если не получится у Скриппса, отправимся дальше на север.».

Институт Скриппса привлекал Констебла не только калифорнийской природой. Констебл начал работать с бесспорным лидером раннего этапа развития ЭМ

методов, в то время некоторой закрытой области даже для Кокса, более известного, как океанограф. Перед приездом Констебла, в 1981 г. Кокс опубликовал статью по морской электроразведке с контролируемым источником (русский эквивалент – ЗС-ЗИ), посвященную опытным работам Восточно-Тихоокеанском поднятии. Предметом исследования тогда была океанская литосфера.



Проф. Стив Констебл

По словам Констебла, на освоение морских ЭМ методов ушло около шести лет. Но за время «ученичества» у Кокса он внес важный вклад – теоретический и практический – в превращение ЗС-ЗИ в современный промышленный метод. Основанием своей карьеры, он считает работы 1987 г. по решению обратной задачи ЭМЗ в рамках гладкой модели (OCCAM), опубликованную совместно с женой и Бобом Паркером (Bob Parker); до этого он зависел от финансирования научной работы. Алгоритм OCCAM широко используется во всем мире. Признание пришло чуть позже, когда в 1991 г. когда он, совместно с Найджелом Эдвардсом и д-ром Аланом Чейвом (Alan Chave; ныне он Океанографическом институте Вудс-Хоул - Woods Hole Oceanographic Institution), работал над главой по морской электроразведке во 2-м томе книги «Электромагнитные методы в прикладной геофизике» (*Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*), изданной SEG.

В начале работы в Институте Скриппса Констебл, вместе с коллегами (Чейвом и Спаром Уэббом – Spahr Webb), продолжал работы Кокса по изучению распространения ЭМ сигналов в породах морского дна. Он рассказывает: «Чип получил средства от ВМС США через Агентство по передовым исследованиям в оборонной области (Defense Advance Research Projects Agency), которое, как я полагаю, интересовалось его работами в области подводной связи». Их статья в журнале *Nature* поясняет, чем занимался Констебл. В статье речь идет о затухании сигналов, пришедших из атмосферы, в диапазоне частот 0.06–24 Гц в морской воде, и обосновывается применение магнитотеллурических методов для исследования геоэлектрического разреза. Новый метод, ныне называемы обычно ЗС-ЗИ, подразумевал буксировку горизонтальной дипольной антенны по дну. Электрические поля, распространяющиеся в проводящем основании, регистрировались донными датчиками на расстоянии ёо-65 км. Данные той экспедиции на НИС *New Horizon* и *Ellen*

## Электроразведка на нефть и газ



*Морская лаборатория Института Скриппса ведет работы ЗС-ЗИ и МТЗ по проекту HyREX 2004 на Гидратном хребте у берегов Орегона (сентябрь 2004 г., НИС «New Horizon»).*

*B. Scripps, согласовывались с простой слоистой моделью строения земли до глубин 3–7 км, состоявшей из умеренно проводящей коры, подстилаемой мощным изолятором. По мнению Констебла, верхняя мантия холодна и суха.*

Под некоторые из этих ранних работ выделялись средства со стороны нефтяных компаний. «Вскоре после моего прибытия мы провели работы для маленькой группы нефтяных компаний, но глубина моря была в том районе всего 300 м. Тогда ставилась задача геологического картирования, идея о поиске углеводородов еще не было». Констебл говорит также, что к концу 1980-х внимание со стороны отрасли угасло, отчасти в связи с кризисом цен на нефть, отчасти – в связи с переходом компаний на 3D сейсморазведку, внедрение которой тогда начиналось. Попытки получить средства от нефтяников иногда повторялись, но без успеха. «Поддержки не было никакой», говорит Констебл, «время ЗС-ЗИ еще не пришло, главным образом потому, что работы велись еще на мелководье. Тем не менее, отмечает он, один из аналитиков Exxon, д-р Лен Шринка (Len Srnka), всегда следил за работами Института по морским ЭМЗ, а в 1986 г. сам получил патент и стал инициатором применения ЗС-ЗИ (под названием «Картирование залежей по УЭС» - Reservoir Resistivity Mapping, R3M) в ExxonMobil.

В 1980-е годы Констебл много работал в малопонятной области разработки и изготовления эффективной аппаратуры для нового метода ЗС-ЗИ. «В те времена все было большим. Сейчас все просто, а тогда мы использовали контейнеры диаметром 12 дюймов и регистраторы, которые переносили вчетвером!»

В 1988 г. Констебл и его коллеги провели эксперимент «Пегас» (Pegasus) – опытные работы ЗС-ЗИ. Эксперимент показал перспективность методики и аппаратуры, созданных в Институте. «Впервые удалось получить полный набор данных», говорит он, но пришлось потерпеть из-за проблем с финансированием. Но помочь, правда, со стороны учебного заведения, все же пришла. Проф. Марин Синха (Martin Sinha), морской сейсмолог из Кембриджского университета, Великобритания, связался с Констеблом, а затем и приехал в Институт, чтобы обсудить возможное сотрудничество в проектах по ЗС-ЗИ и МТЗ.

У Синха были средства на пятилетние исследования по применению морских ЭМЗ на срединно-океанических хребтах. Для этих работ кембриджская группа Синхи поручила Институту изготовление специального источника DASI (deep towed active source instrument – глубоководный буксируемый активный источник).

Между группами Констебла в Институте и Синхи в Кембридже установилось плодотворное сотрудничество. При финансировании со стороны США через Национальный научный фонд (National Science Foundation, NSF) и Великобритании через Национальный совет по экологическим исследованиям (National Environmental Research Council) прошли опытные морские работы ЗС-ЗИ. Для совместных морских работ Констебл предоставлял приемники и новый мощный источник DASI. Первый эксперимент был поставлен в 1989 г. на Восточно-Тихоокеанском поднятии. Констебл лучше помнит второй совместный проект – работы 1993 г. на хребте Рейкьянес (Reykjanes Ridge). Для него это был момент, когда он, после 10 лет научной работы, мог искренне сказать «Эврика!». «Усилия по запуску аппаратурой были так велики, что порой забывалось, для чего это нужно. Но в том рейсе я увидел важные связи между морскими МТЗ и ЭМЗ».

Институт и Кембридж работали вместе на протяжении всех 1990-х годов, и в 1995 г. провели третий эксперимент, во впадине Lau (Lau Basin) и регулярно публиковали результаты. Некоторые ученые из Кембриджа приезжали в Институт, обычно на пару месяцев, работать по тематике своих магистерских диссертаций и PhD, как правило – в области обработки данных ЭМЗ. Сотрудничество ученых было увлекательно, но Констеблу, геофизику-практику, было неудобно находиться в зависимости от нестабильного финансирования NSF. Так что в 1994 г. он с энтузиазмом откликнулся на предложение разрабатывать аппаратуру для морских работ, сделанное электроразведочной компанией AOA Geophysics из г. Остина, шт. Техас, во главе с Арнольдом Оранджем (Arnold Orange). История продолжилась.

«Я помог UCSD запатентовать донную аппаратуру не потому, что считал ее чем-то необычайно умным или очень доходным, но потому, что так Университет мог

## Электроразведка на нефть и газ

сотрудничать с Оранджем на основе лицензии на запатентованный метод. Я собирался обращаться к нефтяным компаниям за средствами на совершенствование аппарата и методики, и мне хотелось предложить им непросто результат, полученный в башне из слоновой кости, а технологию, пригодную для производственного применения. Но мне совсем не хотелось ходить в рейсы и собирать закрытые данные, которые нельзя публиковать.

«Обучая сотрудников Арни и предоставляя им аппаратуру, мы давали компаниям доступ к зарождающейся технологии для производственных работ еще на ранней стадии ее развития; тем самым, чтобы получить аппаратуру, они спонсировали исследования!»

Схема работала хорошо и в какой-то мере работает и сейчас. Участие производственников не только решило проблемы зарплаты Констебла, но и позволило ему привлечь студентов, что было непросто сделать только на средства NSF. «За 10 лет Институт построил серию из 45 донных датчиков и двух источников. Исследования по морским ЭМЗ получили большее доверие у NSF, и Констебл указывает, что наличие базы для производства аппаратуры стоимостью 2 млн. долл., оплаченной без привлечения средств NSF и лишь при незначительном участии Института, дает ему гораздо большую уверенность при подаче заявок на чисто научные цели. В прошлом году, например, Констебл на средства NSF организовал для студентов экспедицию на магматические очаги Восточно-Тихоокеанского поднятия, и провел крупнейшие за всю историю, по его словам, работы по морским ЭМЗ.

Проект 1994 г. с АОА возник из желания заказчика приспособить наземный метод МТЗ к морским работам. «Проблема была в том, объясняет Констебл, чтобы создать аппаратуру, подходящую для производственных работ, т. е. в условиях континентального шельфа, а не на океанских глубинах, где мы проводили научную работу. По иронии, мы переделали для этих нужд аппаратуру ЗС-ЗИ».

Успешные испытания этой аппаратуры для МТЗ прошли около Сан-Диего в 1994 г. Далее последовали производственные работы для Agip в Средиземном море (1995 г.) а затем для Agip и BP в Мексиканском заливе. Констебл признает, что МТЗ сейчас не в моде, но он твердо убежден, что комплекс МТЗ и ЗС-ЗИ будет вскоре применяться в нефтяной отрасли. «МТЗ сейчас оставляют в стороне, так как считается, что он не чувствителен к тонким высокоомным слоям, но он все же полезен при геологическом картировании, отвечая на существенные вопросы: где основание соляного купола? надвинуты ли карбонаты? есть ли осадки под лавами? И так далее».

Мы дошли до момента, отделенного 15 годами от начала работ Констебла в области морских ЭМЗ, момента, когда ему удалось вновь обратить внимание нефтяных компаний на этот метод. Неожиданно на него вышла норвежская компания Statoil, которая хотела модернизировать метод под названием «каротаж морского дна» (SeaBed Logging, SBL), который предложил исследовательский центр компании в Тронхейме. Констебл был удивлен идеей этой группы применять донные ЭМЗ для прогноза флюидосодержания по профилям работ. «Всегда считалось, что ЭМЗ чувствуют тонкие высокоомные слои, но я никогда не рассматривал это как возможность прямого поиска углеводородов. У них была хорошая идея, но мне показалось, что они воплощают ее как-то странно.»

Констебл общался с сотрудниками Statoil три дня и в конце концов дал свое благословение. В его отчете за 1999 г. говорится: «Для проверки количественных и качественных выводов Statoil я применил программу моделирования поля точечного источника в слоистой среде. Должен также отметить, что выбор ЗС-ЗИ оправдан, так как, в отличие от других видов ЭМЗ (МТЗ в частности), этот метод чувствует тонкие высокоомные слои. В заключение хочу сказать, что предложенный метод имеет шансы на успех при поиске достаточно

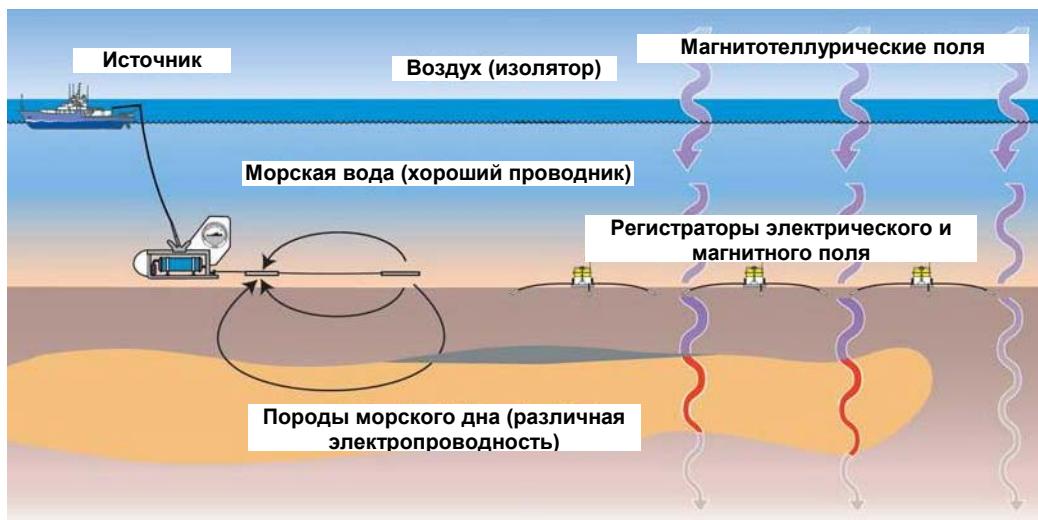


Схема работ ЗС-ЗИ с буксируемым источником и донными приемниками

## Электроразведка на нефть и газ



Февраль 2004. Морская лаборатория Института Скриппса проводит крупнейшие работы по ЭМЗ (НИС «Roger Revelle»)

крупных объектов. При согласии Statoil продолжать эту программу, следует провести полевые испытания ...»

Констебл был удивлен, с какой скоростью стали развиваться события после этого. Сначала Констебл вместе с Шинхой и Люси МакГрегор (Lucy McGregor), перешедшими из Кембриджа в Океанографический центр Университета Саутгемптона, помогал Statoil готовить их первые работы на акватории. «Нам пришлось объяснить им основы морских ЭМЗ, расчета прямой задачи, и, что важно, предоставить им нашу аппаратуру». В ноябре 2000 г. Statoil начала первые работы ЭМЗ на глубокой воде у берегов Анголы с целью выявления возможности прямого поиска углеводородов. Во многом это был классический научный эксперимент, который проводили Констебл, Шинха и МакГрегор на борту британского НИС *Charles Darwin* с приемниками из Института и источником DASI из Саутгемптона. Экспедиция прошла успешно, по ее результатам были подготовлены ряд докладов и статей; одна из первых появилась в First Break в марте 2002 г. за подписью всех участников.

В октябре 2001 г. прошли вторые работы по методике SBL по заказу Statoil, Shell и Enterprise перед 17 туром аукционов по норвежским концессиям. По сути, это было испытание SBL как производственного метода, и его успех позволил Statoil создать компанию Electromagnetic GeoServices (emgs) во главе с Терье Эйдесмо (Terje Eidesmo) Свеном Эллингрудом (Svein Ellingsrud) и Сталем Йохансеном (Stale Johansen) ведущими специалистами Statoil в области SLB. Работы велись с борта НИС *Polar Bjorn*, вновь с источниками DASI, арендованными в Саутгемптоне, и приемниками из Института. Для работы с приемниками привлекли компанию Арнольда Оранджа. За работы в целом отвечала Multiwave Geophysical.

Еще во время первой, ангольской, экспедиции, говорит Констебл, он обсуждал планы проверки морских ЭМЗ на прямой поиск углеводородов с Леном Шринкой из ExxonMobil. «Мне было ясно», говорит Констебл, «что их подход гораздо более сложен. Но на начальной стадии им нужно было оборудование, наше и из Саутгемптона, через компанию Арнольда. Оглядываясь назад, неверно было бы думать что какой-то один человек или одна организация может в одиночку проводить морские ЭМЗ»

для поиска нефти и газа. На мой взгляд, дело в том, что метод дает более надежные результаты на глубокой воде, что выяснилось уже по ходу дела. Опыту университетов нужно доверять больше, это позволит продвигаться вперед быстрее».

За последние два года Констебл был свидетелем реального применения морских ЭМЗ при поисках нефти и газа уже без его участия. Вслед за emgs, появилась компания Offshore Hydrocarbon Mapping (OHM), созданная при Университете Саутгемптона, где главным специалистом стала Люси МакГрегор. В то же время АОА, консалтинговая группа во главе с Арнольдом Оранджем образовала в 2002 г. филиал, АОА Geomarine Operations (AGO), который сосредоточился на ЭМЗ. Просуществовал он недолго – в октябре 2004 его купила Schlumberger, которая теперь тоже активно ведет такие работы. Во всех случаях компании специально делают новую аппаратуру, под конкретные производственные нужды. Emgs провела около 70 работ на собственном оборудовании. Многие ранние работы OHM и AGO проводились в рамках проектов Exxon Mobil по R3M, главным образом у берегов Западной Африки, и, соответственно, с ее источниками и приемниками. Обе компании хотели бы сами выполнять все виды работ.

Констебл говорит, что к новой ситуации нужно привыкнуть. «Еще вчера у меня был единственный в мире комплект аппаратуры для таких работ, а сегодня роль университета едва заметна». Он говорит, что не жалеет об этом, главным образом, потому, что не ведет бизнес в этой сфере. Он с 1998 г. профессор в постоянном штате Института, читает курсы, месяц в году проводит в рейсах и видит в морских ЭМЗ еще много предметов для научного исследования, в частности – поиск газогидратов, особенно для постановки бурения. У него есть и другие интересы: недавно вместе с женой (тоже профессором) он написал работу «Исследование геомагнитного поля по спутниковым данным при исследовании проводимости мантии».

Опыт связи ЭМЗ с нефтяной отраслью Констебл получил довольно рано. Ему еще нет и пятидесяти, и есть ощущение, что он еще не раз сможет воскликнуть «Эврика!»