

УДК 550. 837.3

С.П. Левашов¹, В.Г. Бахмутов³, И.Н. Корчагин³, Ю.М. Пищаный²,
Н.А. Якимчук¹

ЭКСПРЕСС-ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В УКРАИНСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ ЭКСПЕДИЦИЯХ

В статье представлены информационные материалы о технологии СКИП-ВЭРЗ и ее применении в сезонных работах 9-й и 11-й Украинских антарктических экспедиций 2006 г., а также акцентируется внимание на двух примерах ее использования с целью изучения структуры осадочного чехла и неоднородностей кристаллического фундамента.

Введение. Экспресс-технология геоэлектрических исследований, которая включает метод становления короткоимпульсного поля (СКИП), флюксометрическую съемку и метод вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) [2-5,17], за последние пять лет в полной мере продемонстрировала свою эффективность и оперативность при решении разнообразных экологических, инженерно-геологических, гидрогеологических и геолого-геофизических задач. Она успешно применялась для обнаружения и картирования загрязненных нефтепродуктами участков [19], обследования и мониторинга гидрогеологических условий и инженерно-геологического состояния исторических и архитектурных памятников и сооружений [7,14,18], выявления и локализации утечек из подземных водных коммуникаций [1,16], поисков и картирования зон увлажнения, подземных водных потоков и коллекторов воды [9,20,21] и т.д. Перечисленные выше геоэлектрические методы являются также основными компонентами технологии “прямых” поисков и разведки скоплений углеводородов (УВ), которая прошла широкую апробацию на месторождениях УВ и перспективных на нефть и газ участках и площадях в Западном Казахстане, Украине, Болгарии и России [2-6,10]. Практический опыт применения технологии свидетельствует, что она также может успешно использоваться для обнаружения и картирования зон повышенного содержания свободного метана в углях и во вмещающих их породах на угольных шахтах [11,13].

Компоненты технологии и аппаратура. Геоэлектрические методы исследований базируются на изучении геоэлектрических параметров среды в импульсных неустановившихся геоэлектрических полях, а также квазистационарного электрического поля Земли и его спектральных характеристик над определенными объектами (залежами УВ, например).

1. Методом СКИП регистрируется процесс становления поля короткого электрического импульса в малогабаритных дипольных ферритовых ан-

© С.П. Левашов¹, В.Г. Бахмутов³, И.Н. Корчагин³, Ю.М. Пищаный², Н.А. Якимчук¹

¹ Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии, Киев, Украина,

² Центр менеджмента и маркетинга в области наук о Земле ИГН НАНУ, Киев, Украина,

³ Институт геофизики НАН Украины

теннах. Использование в разработанной модификации метода коротких и мощных электрических импульсов дало возможность отказаться от использования длинных линий, что существенно сокращает время наблюдений в физической точке, а, следовательно, значительно повышает производительность и экономичность разработанной модификации становления поля в сравнении с существующими.

2. Вертикальное электрорезонансное зондирование основано на изучении процессов естественной поляризации среды и спектральных характеристик естественного электрического поля над объектом исследований. Для горизонтальнослоистых разрезов эта составляющая технологии дает возможность эффективно разделять разрез в точке зондирования на отдельные разновидности и с высокой точностью определять глубину их залегания. Эффективность зондирования значительно повышается при наличии в районах исследований задокументированных параметрических буровых скважин, которые предоставляют возможность соответствующим образом «калибровать» диаграмму зондирования — связать отдельные интервалы значений на диаграмме с соответствующими стратиграфическими единицами разреза.

Геоэлектрическая съемка методом СКИП позволяет решать задачи, связанные с площадным картированием и построением геоэлектрических разрезов или глубинных срезов участков, имеющих разную удельную электропроводность горных пород.

В процессе картирования методом СКИП импульсным генератором формируются и подаются на генераторную антенну электромагнитные импульсы продолжительностью не более 10 мкс.

Процесс становления поля регистрируется приемной малогабаритной ферритовой антенной со следующим соотношением параметров активного сопротивления (R), индуктивности (L) и емкости (C): $R \ll 2\sqrt{L/C}$. Для антенны с подобным соотношением параметров процесс становления поля имеет колебательный характер. Регистрация импульсов релаксации поля возможна лишь антеннами с относительно маленькими значениями междувитковой емкости (C). Такие антенны более чувствительны к изменениям параметров диэлектрических свойств междувиткового пространства.

Над зонами пониженной и повышенной электропроводности длительность временных интервалов становления сигналов различной полярности различна. Поэтому дифференциация областей съемок по времени становления поля для сигналов разной полярности дает возможность определять зоны повышенной и пониженной проводимости пород. Первые из них связаны с наличием водонасыщенных участков пород (пластовыми или трещинными водами). Пониженная проводимость наблюдается в областях восходящих диффузионно-фильтрационных потоков разнообразных флюидов (растворы, газы).

Регистрация колебательного процесса становления поля происходит с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сигналов. Оцифрованный сигнал записывается и сохраняется на жестком диске компьютера.

Характер колебательного процесса становления импульсного поля в приемной антенне связан с изменением плотности положительно и отрицательно заряженных ионов в области расположения генераторной и приемной антенн (в приповерхностной части атмосферы). Над зонами пониженной проводимости происходит увеличение концентрации отрицательных ионов, над зонами повышенной проводимости — соответственно, положительных. Функция распределения плотности ионных зарядов определяется значениями напряженности естественного квазистационарного электрического поля Земли. На участках пониженной проводимости на поверхности раздела земля-воздух отмечается снижение напряженности этого поля, в то время как в зонах повышенной проводимости напряженность поля возрастает. Распределение свободных зарядов в приповерхностном слое атмосферы компенсирует неоднородности в напряженности естественного поля, приводя его, таким образом, к единому уровню. Следовательно, вдоль поверхности раздела земля-воздух существуют зоны повышенной и пониженной плотности зарядов разных знаков, которые несут определенную информацию о геоэлектрических свойствах среды.

Принцип электрорезонансного зондирования. В основу метода ВЭРЗ положен эффект поляризации геоэлектрических неоднородностей разреза в естественном квазистационарном электрическом поле Земли $E(z)$. На границах между неоднородностями разреза, которые характеризуются аномальными значениями геоэлектрических параметров среды, в электрическом поле Земли формируются зоны поляризации, образующие с аналогичной зоной поляризации на границе земля-воздух систему электрических диполей. При естественном изменении или искусственном возбуждении $E(z)$ сформированные электрические диполи начинают излучать электромагнитные колебания с длиной волны $l = 2H$, где H — глубина до поверхности отдельного поляризованного объекта (границы).

На дневной поверхности наблюдается суммарное электромагнитное поле, которое вызвано изменениями естественного электрического потенциала. Данное поле можно представить в виде волнового пакета электромагнитных колебаний; половина длины каждой волны пакета отвечает глубине залегания отдельной поляризованной поверхности. Идентификация (выделение из пакета) и изучение отдельных электромагнитных колебаний дает возможность определить интервалы глубин залегания аномальных геоэлектрических объектов. Идентификация и регистрация на поверхности отдельных волн пакета и определение их характеристик может осуществляться с помощью подбора резонансной частоты генератора электромагнитных колебаний, или же с помощью длинных линий.

Полевые наблюдения осуществляются портативными аппаратурными комплексами "GEMA" и ВЭРЗ [4,5,17], которые с помощью программного интерфейса соединены с GPS-приемником и полевым компьютером. Использование GPS-системы в аппаратурном комплексе существенно повышает эффективность полевых наблюдений. Непосредственно в полевых условиях (морских акваториях) оперативно осуществляется обработка данных геоэлектрических наблюдений, анализируются полученные результаты, кор-

ректируется последовательность наблюдений и проводится предварительная интерпретация данных. Комплексы обслуживаются одним — двумя операторами.

Опробование метода

Геоэлектрические исследования в 9-й Украинской антарктической экспедиции (УАЭ). Методические вопросы проведения геоэлектрических измерений с использованием технологии СКИП-ВЭРЗ в акваториях морей с борта судна отрабатывалась впервые в 2004 г. в сезонных работах в районе УАС “Академик Вернадский”, а также в близлежащих акваториях Антарктического полуострова и проливе Дрейка. Полученные в антарктическом регионе результаты еще раз подтвердили высокую оперативность и эффективность технологии СКИП-ВЭРЗ, а также практически продемонстрировали возможность ее применения при проведении геолого-геофизических исследований в морских акваториях.

Сезонные работы в Антарктиде открыли также новые направления эффективного применения технологии ВЭРЗ. Во-первых, с помощью электрорезонансного зондирования определена мощность (толщина) малого ледника на о. Галиндез, что позволило с учетом детальных картографических данных построить как трехмерную модель самой ледовой крыши, так и детальную карту-схему подледного рельефа кристаллических пород острова [8]. Во-вторых, результаты зондирования в антарктическом регионе еще раз продемонстрировали необходимость более широкого применения метода ВЭРЗ для изучения глубинного строения земной коры — структуры осадочного чехла и неоднородностей кристаллического фундамента.

Значительный объем измерений методом СКИП, а также зондирований ВЭРЗ выполнен в акваториях: вблизи УАС “Академик Вернадский”, в окрестностях Южно-Шетландских островов, в проливах Брансфилда и Дрейка. Съёмка СКИП вдоль профиля в районе вулканического комплекса Десепши показала, что жерло подводного вулкана располагается в высокоградиентной зоне смены знака аномальных значений СКИП с положительных на отрицательные [15,22]. Впоследствии аналогичный характер поведения поля СКИП был установлен геоэлектрическими исследованиями на грязевых вулканах Керченского полуострова, в частности Джау-Тепе [15]. Анализ данных съёмки и их сопоставление с имеющимися геолого-геофизическими материалами показал, что на участках смены знака аномальной кривой фиксируются также зоны тектонических нарушений.

Электрорезонансное зондирование в акваториях проводилось как на станциях отбора образцов осадочных пород, так и по ходу движения экспедиционного судна, что позволило отработать значительное количество профилей геоэлектрических наблюдений, в том числе и через пролив Дрейка. Это обстоятельство еще раз подчеркивает, что одним из определяющих достоинств технологии геоэлектрических исследований СКИП-ВЭРЗ по сравнению с другими методами как раз и является во-первых возможность проводить наблюдения с движущегося автомобиля, вездехода, корабля, катера, что позволяет оперативно обследовать значительные площади в сжатые сро-

ки, а во-вторых — проводить непрерывные геоэлектрические наблюдения на переходах (переездах) к отдельным участкам, полигонам, объектам исследований.

Используемый в 2004 г. аппаратный комплекс позволял осуществлять зондирование только до 6000 м. В результате обработки все данные ВЭРЗ в отдельных точках представлены графически диаграммами зондирования и стратиграфическими колонками [22]. В доступном интервале зондирования (0-6000 м) практически на всех диаграммах выделяются следующие горизонты: вода, первый и второй осадочные слои, породы кристаллического фундамента. Во многих точках зондирования непосредственно в теле фундамента диаграммами зондирования фиксируются участки повышенных значений поляризации и геоэлектрического сопротивления (так называемые зоны даек), а также участки пониженного геоэлектрического сопротивления (зоны дробления). Характерная особенность зондирований в акваториях состояла в том, что в процессе физических измерений граница между водным слоем и первым осадочным горизонтом на диаграммах зондирования фиксировалась неуверенно — скорее всего из-за наличия слоя сильно обводненных илистых осадков.

По данным зондирований в отдельных точках вдоль профилей построены геоэлектрические разрезы (всего 9, в том числе и через пр. Дрейка протяженностью около тысячи километров). Два геоэлектрических разреза выполнены также по сейсмическим профилям, проходящим вдоль и поперек пр. Брансфилд. В продольном разрезе в северо-восточной части пролива в теле фундамента по данным ВЭРЗ выделяется обширная зона пониженного геоэлектрического сопротивления [22]. Эта зона отличается от юго-западной части разреза, где зоны пониженного сопротивления чередуются с участками повышенных значений поляризации и сопротивления. Зоны повышенного сопротивления имеют здесь вид наклонных даек. На поперечном разрезе зоны повышенного сопротивления расположены практически субгоризонтально. В северо-западной части разреза в теле фундамента фиксируется массивная зона пониженного геоэлектрического сопротивления.

Изучение внутренней структуры кристаллического массива. В 2004-2005 гг. технология СКИП-ВЭРЗ применялась для изучения внутреннего строения кристаллического массива в восточной части Коростенского плутона (Вереснянская площадь) [12]. Основные задачи исследований заключались в обнаружении и картировании зон дробления и трещиноватости кристаллического массива, трассировке основных тектонических нарушений, выделении ненарушенных (моноклитных) блоков, пригодных для строительства хранилищ радиоактивных отходов геологического типа.

Опыт практического применения съемки СКИП показал, что метод позволяет находить и картировать аномальные геоэлектрические зоны повышенной и пониженной поляризации пород. В кристаллических массивах участки повышенной поляризации могут быть связаны с неоднородностями фундамента, наличием даек, разломов, трещиноватости, зон дробления и др. Поляризуемость зон трещиноватости, дробления и разломов существенно повышается в случаях их заполнения флюидами и газами. Участки же

монолитных блоков массива характеризуются пониженными значениями поляризации, и над ними временной интервал становления коротких электромагнитных импульсов уменьшается. Поэтому аномальные геоэлектрические зоны пониженной поляризации, выделенные по картам площадной съемки СКИП, соответствуют наименее тектонически активным участкам в пределах кристаллических массивов.

Задачи изучения внутреннего строения фундамента, выделения в нем монолитных блоков актуальны при строительстве объектов повышенного риска — атомных станций, химических и нефтеперерабатывающих заводов, хранилищ различного типа. Существенный интерес представляют также и задача выделения и картирования в теле фундамента раздробленных и нарушенных зон, а также участков пониженной скорости и плотности пород (волноводов), с которыми могут быть связаны залежи нефти и газа.

Геоэлектрические исследования на Вереснянской площади позволили выделить и частично оконтурить в центральной части участка блок ненарушенных пород фундамента размером 4×2 км. Глубина кровли массивного блока варьирует от 300 до 500 м, подошва блока зафиксирована в интервале глубин 2000-4000 м. С северной части блок ограничен субширотным тектоническим нарушением, с запада и востока — зонами дробления.

Полученные результаты показали, что технология ВЭРЗ позволяет выделять в разрезах пород кристаллических массивов интервалы глубин, в пределах которых расположены аномально поляризованные зоны (АПЗ), которые обусловлены различными неоднородностями пород массива, в том числе тектоническими нарушениями и зонами дробления как вертикального, так и латерального заложения. Данные ВЭРЗ позволяют строить вертикальные геоэлектрические разрезы и карты отдельных горизонтов кристаллического массива.

На втором этапе геоэлектрических исследований в пределах Вереснянской площади [12] прошел практическую апробацию и продемонстрировал свою работоспособность и эффективность модифицированный аппаратный комплекс электрорезонансного зондирования. В результате модификации регистрирующей аппаратуры и разработки программного обеспечения компьютерной регистрации данных измерений процесс зондирования был автоматизирован, что обусловило существенное сокращение времени зондирования в отдельной физической точке. Параллельно с этим глубина зондирования была увеличена с 6000 до 8000 м.

В целях дальнейшего применения технологии ВЭРЗ для изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии при подготовке к 11-ой УАЭ глубина зондирования модифицированного аппаратного комплекса была увеличена до 32000 м. Тестовые испытания аппаратуры в окрестностях Киева показали ее работоспособность на таких глубинах. Практическую же апробацию аппаратный комплекс ВЭРЗ на большие глубины прошел в Антарктическом регионе во время проведения сезонных работ 11-й Украинской антарктической экспедиции в январе-феврале 2006 г.

Геоэлектрические исследования в 11-й УАЭ. Как и в УАЭ 2004 г., во время сезонных работ 2006 г. геоэлектрические исследования проводились в пределах суши на леднике, а также в прибрежных водах с борта судна.

Определение мощности ледника Уиггинс. Ледник расположен на западном побережье Антарктического полуострова, в 7.5 км восточнее о. Галиндез. Северная и центральная части ледника раздроблены многочисленными трещинами, в силу чего определить мощность льда зондированием в этих частях ледника не представляется возможным.

Зондирование проведено вдоль двух профилей — продольного № I-I' (5500 м) и поперечного №2-2а (500 м). Продольный профиль был проложен по относительно безопасному для передвижения маршруту вдоль южного борта ледника в широтном направлении. Поперечный профиль ориентирован вдоль береговой линии, на расстоянии 1000 м от берега. Вдоль первого профиля выполнено 28 пунктов ВЭРЗ, вдоль второго — 6. Геоэлектрический разрез по профилю II-II' представлен на рис. 1.

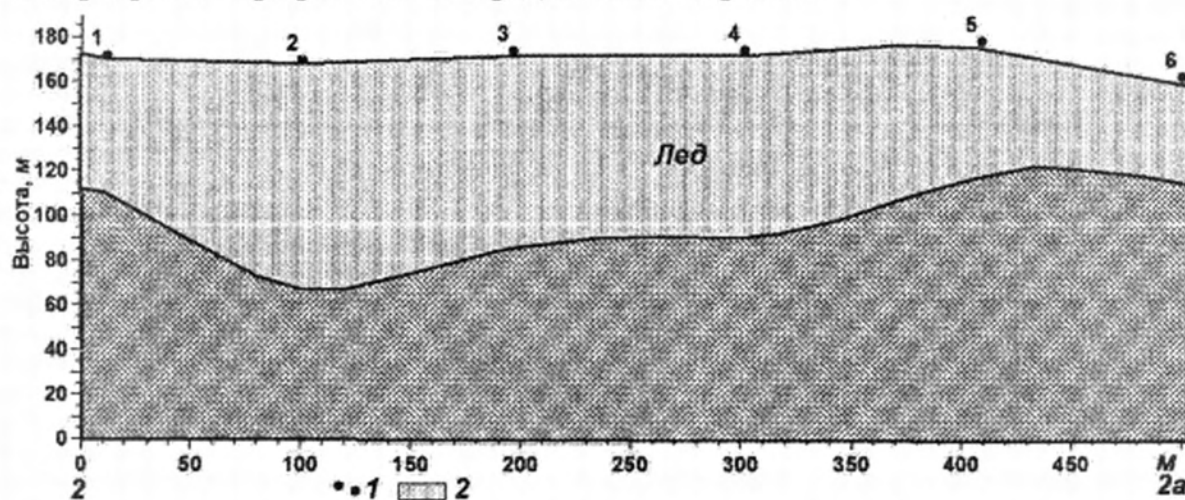


Рис. 1. Результаты определения мощности ледового покрова ледника Уиггинс (поперечный профиль II-II' вдоль береговой линии на расстоянии 1000 м от берега). 1 — пункты определения мощности ледового покрытия № 1-6 (координаты пункта ВЭРЗ № 1 — $S65^{\circ}14'37.9''$, $W64^{\circ}03'42.2''$ и ВЭРЗ № 6 — $S65^{\circ}14'52.3''$, $W64^{\circ}03'46.0''$); 2 — зона ледового покрытия

Максимальная мощность ледового покрытия зафиксирована на продольном профиле в пункте № 12, где мощность ледника составляет 162 м. Точка № 12 расположена в двух километрах от береговой линии. В этом месте с южной стороны к леднику примыкает ледовый приток. Далее профиль зондирования прижимается ближе к бортовой части ледника, и мощность ледового покрытия в этом месте значительно уменьшается.

В процессе зондирований абсолютные значения высот в точках измерений определялись с помощью GPS-приемника.

Геоэлектрические наблюдения с борта судна в акваториях. Условия работ. С 24 января по 12 февраля 2006 г. пройдено свыше 4540 км маршрутов. Траектории движения судна и дневник морской экспедиции представлены на рис. 2.

Условия для работ были очень жесткими — большинство измерений выполнено, в основном, по ходу движения судна. Из-за проблем со временем и с выбором маршрутов передвижения судна, к сожалению, не удалось выполнить запланированные геоэлектрические измерения вдоль сейсмического профиля, пересекающего пр. Брансфилда и Южно-Шетландский же-

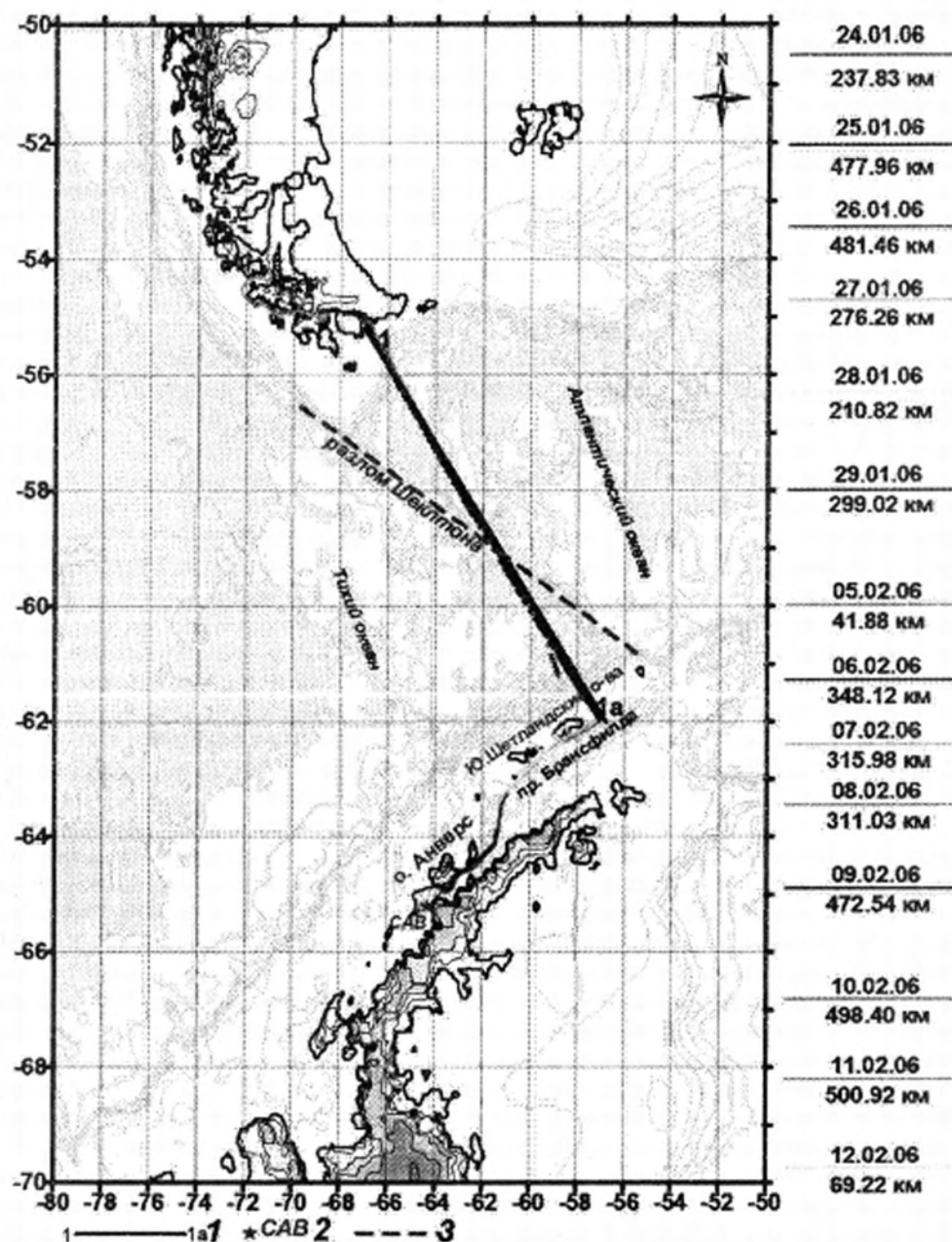


Рис. 2. Схема движения судна в 11-й УАЭ с дневником морской части экспедиции и расположение профиля ВЭРЗ № 1 через пр. Дрейка. 1 — профиль зондирования по ходу судна; 2 — УАЭ "Академик Вернадский" (о. Галиндез); 3 — разломная зона Шеклтона

лоб. Этот профиль представляет существенный интерес с точки зрения геологического строения региона; он отработан польскими геофизиками.

Особенности зондирования. Практически во всех пунктах (интервалах траектории движения) измерений зондирование выполнялось до глубины 32760 м с шагом 10 м, следовательно, каждая диаграмма зондирования состоит из 3276 записей. В среднем процесс зондирования в одной точке занимал порядка 20 минут. За это время судно успевало переместиться по курсу движения в среднем на 4 км. При построении диаграмм зондирования значения глубин геологических неоднородностей относились к середине интервала перемещения судна за время измерения. В процессе измерений в каждой точке фиксировались также координаты начала и конца изме-

рений. Это позволяет при необходимости легко спроецировать точки привязки измерений на интервал передвижения судна за один цикл измерения.

Всего за время экспедиции в акваториях выполнено более 200 зондирований, из которых около 150 оказались кондиционными. Некондиционные диаграммы получены, в основном, в первые дни экспедиции, пока не были выяснены и устранены источники помех и наводок на измерительный канал регистрирующего комплекса, обусловленных судовым оборудованием и аппаратурой. Опыт работ в двух экспедициях на разных судах свидетельствуют, что каждое судно характеризуется только свойственной ему системой помех (наводок), на выявление и устранение которых необходим определенный период времени.

Информация о глубинах. При исследованиях в акваториях одним из параметров геологических разрезов является положение нижней границы водного слоя. Измерения в 9-й УАЭ показали, что методом ВЭРЗ эта граница определяется неуверенно. Поэтому в 11-й УАЭ для построения рельефа морского дна использовались данные о глубинах, которые определялись эхолотом. На тех участках профилей, где показания эхолотов отсутствовали (пр. Дрейка), нижняя граница водного слоя устанавливалась по картографическим данным. Глубины морского дна определялись с помощью эхолота одновременно на двух основных частотах — 38 и 120 МГц. На этих частотах значения глубин на некоторых фрагментах профилей значительно отличались. Можно предположить, что на одной из частот акустический сигнал “пробивал” ил и отражался от уплотненной части первого осадочного слоя. В связи с этим, разность значений глубин на двух эхолотах можно считать в первом приближении толщиной отложений ила. На результирующих геоэлектрических разрезах этот параметр (т.е. мощность ила) отображался на отдельном графике.

Представление результатов зондирования вдоль профилей. В 11-й УАЭ вся информация об измерениях представлялась в виде профилей. Результаты геоэлектрических измерений вдоль отдельных профилей представлены в двух видах: вертикальные разрезы фактического материала и геоэлектрические разрезы глубинного строения.

На разрезах фактического материала в графической форме системой горизонтальных и вертикальных графиков отображались цифровые данные геоэлектрических измерений. Горизонтальными графиками изображены данные измерений методом СКИП, глубина морского дна по показаниям эхолотов, мощность отложений ила, а также положение точек зондирования вдоль профиля. Горизонтальные оси горизонтальных графиков: а) ось расстояний вдоль профиля в километрах; б) ось значений долготы точек зондирования в градусах; в) ось значений широты точек в градусах. Вертикальные оси: а) ось значений съемки методом СКИП (милливольты); б) ось мощности отложений ила (метры); в) глобальная ось глубин разреза (метры).

Вертикальными графиками представлены диаграммы зондирования в отдельных пунктах вдоль профиля. Вертикальные оси глубин этих графиков совпадают с вертикальной глобальной осью разреза. Горизонтальные оси вертикальных графиков задают измеренные значения кривой зондирования с шагом 10 м в милливольтках.

Построение геоэлектрического разреза глубинного строения заключается в изучении и анализе разреза по фактическим материалам с одновременным выделением и прослеживанием вдоль разреза его отдельных структурных элементов — слоев, разломов, границ, включений и т.д. по характеру изменения и значениям диаграмм зондирования. Практически разрезы глубинного строения строятся на разрезах фактического материала. При графическом представлении двух типов разрезов они могут накладываться друг на друга или переноситься на отдельные иллюстрации каждый.

Практически в результате интерпретации разрезов фактического материала строятся слоисто-блоковые геометрические модели глубинного строения. Термином геометрические здесь подчеркивается то обстоятельство, что построенные по данным ВЭРЗ модели не наполнены физическими свойствами, такими, например, как скорость и плотность вмещающих их пород.

Краткая характеристика отдельных разрезов. По данным зондирования в отдельных точках сформировано пять профилей различной длины, для которых построены вертикальные разрезы по фактическим материалам и геоэлектрические разрезы глубинного строения.

Профиль 1 самый длинный, проложен через пр. Дрейка, отработан на заключительном этапе возвращения экспедиции в Южную Америку (Чили) (см. рис. 2). Его длина составляет 985 км, вдоль профиля выполнено зондирование в 49 пунктах. Линия профиля пересекает также достаточно важный структурный элемент региона — разломную зону Шеклтона.

Профиль 2 расположен в пр. Брансфилда, проходит параллельно Ю.Шетландским островам, юго-восточнее их (рис. 3). Длина профиля — 130 км, он включает 11 точек зондирования.

Профиль 5 сформирован по результатам зондирования в акваториях, начиная от окрестностей УАС и заканчивая практически серединой профиля 2 (см. рис. 3). В профиль включено 60 точек зондирования, его общая длина равна 465 км.

Перечисленные выше профили охватывают практически все точки зондирования, отработанных за время экспедиции. Тем не менее, по данным зондирования в районе Антарктического полуострова сформированы и построены еще два дополнительных профиля.

Профиль 3 насчитывает 37 точек зондирования, берет свое начало в точке 090 профиля 5 и заканчивается точками ВЭРЗ 058, 057, 145, 146, 147, 148, 149 профиля 2 (см. рис. 3). Его длина — 270 км.

Профиль 4 включает 22 точки ВЭРЗ, начинается точкой зондирования 136 профиля 5 и заканчивается точкой 115 (начальная точка для профиля 5) (см. рис. 3). Длина профиля — 220 км.

Для шестого профиля небольшой длины (25 км) глубинный разрез не строился — на этом профиле впервые в Антарктическом регионе закартирована геоэлектрическая аномалия типа “залежь”, а зондированием в интервале до 3500 м выделено несколько аномально поляризованных пластов типа “залежь углеводородов” (рис. 4). К сожалению, из-за временных затруднений не удалось выполнить в этом районе дополнительные, более детальные исследования с целью оконтуривания аномальной зоны по площа-

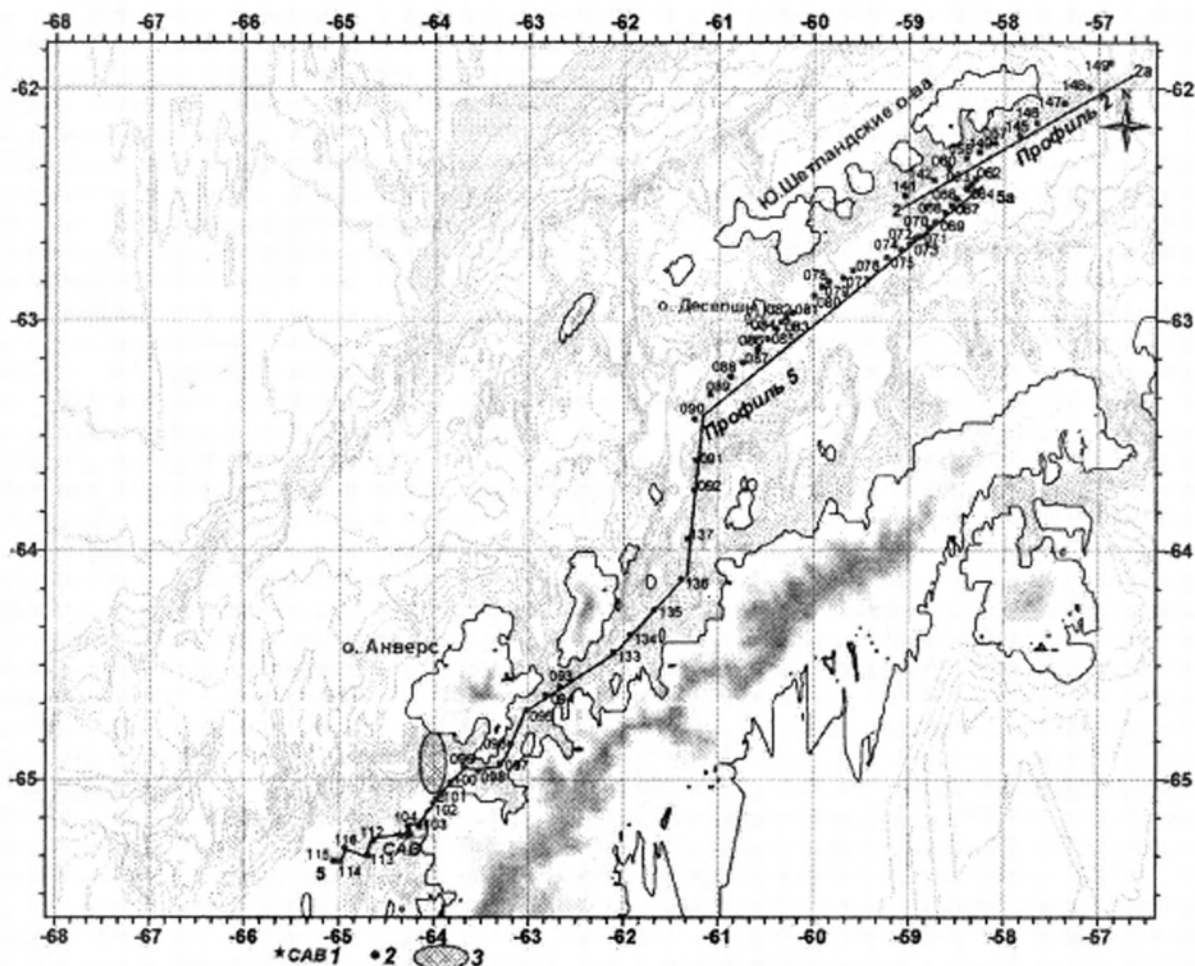


Рис. 3. Схема расположения профилей ВЭРЗ № 2 и 5 в районе Антарктического п-ва. 1 — УАС "Академик Вернадский" (о. Галиндез); 2 — пункты зондирования ВЭРЗ; 3 — зона разуплотнения по альтиметрическим данным

ди и проведения детального зондирования для определения типа предполагаемой углеводородной залежи. Съёмка методом СКИП, а также зондирование ВЭРЗ вдоль этого профиля тоже проводились по ходу движения судна. Положение профиля на карте-схеме района работ не обозначено.

Характерные особенности разрезов глубинного строения. В результате изучения и анализа всех материалов зондирования, сгруппированных в отдельные профили, было решено, что при интерпретации вертикальных разрезов по фактическим материалам целесообразно выделять в разрезе только достаточно крупные по мощности слои. В земной коре таких слоев выделено шесть. Тем не менее, не на всех профилях они фиксируются (на профиле 2, например, выделено всего четыре).

Во многих выделенных структурных элементах земной коры (слоях) могут быть дополнительно выделены по характеру изменения диаграмм зондирования геоэлектрические неоднородности второго порядка.

На всех разрезах уверенно прослеживается граница типа Мохо — между нижней частью земной коры и верхней мантией. И еще одна характерная особенность зондирований — практически во всех точках наблюдений по характеру изменения кривой диаграммы достаточно устойчиво выделяется

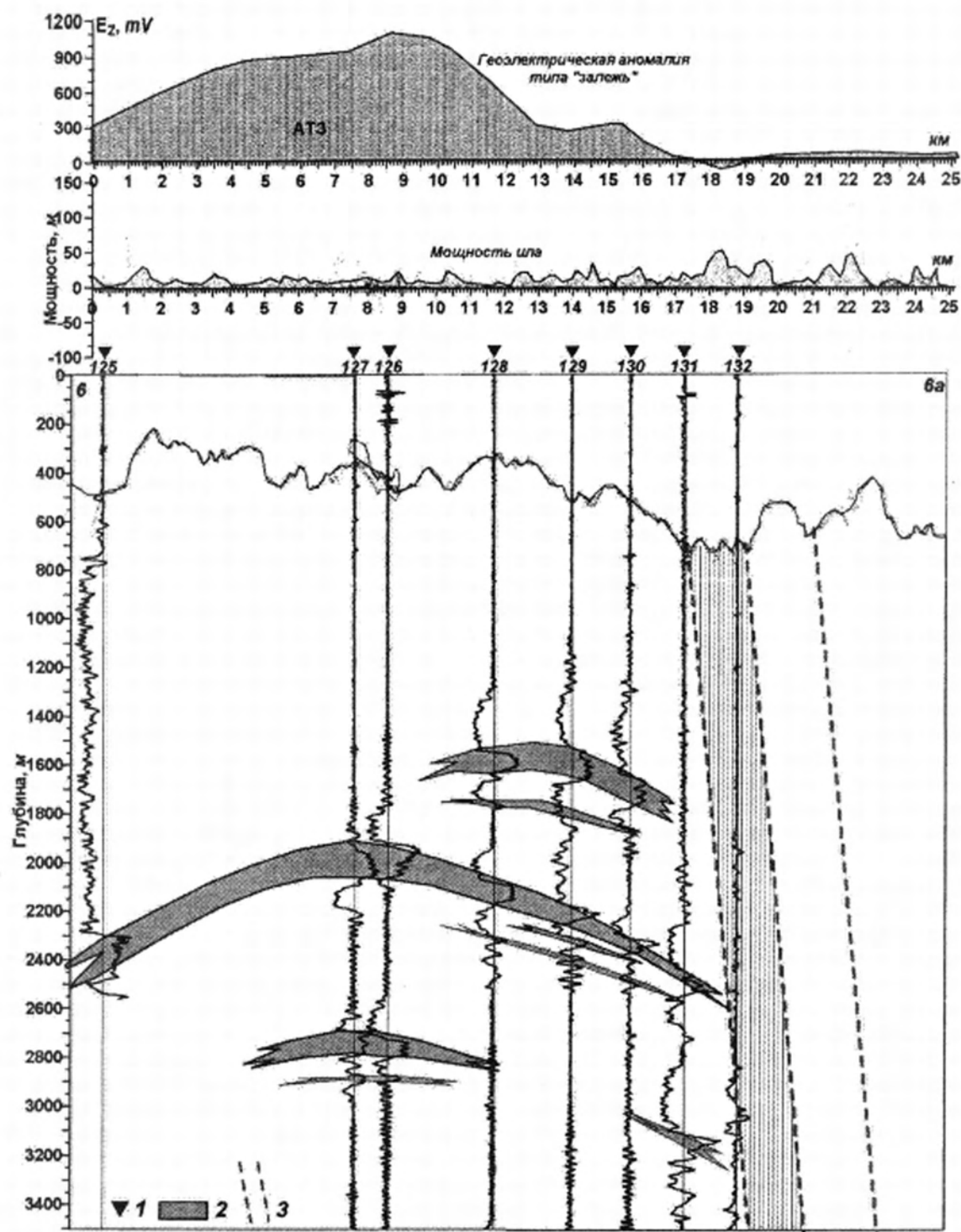


Рис. 4. Результаты вертикального электрорезонансного зондирования над геозлектрической аномальной зоной типа "залежь углеводородов" в регионе Антарктического полуострова. 1 — пункты зондирования ВЭРЗ №№ 125-132; 2 — участки аномально поляризованных пластов типа "залежь углеводородов"; 3 — зона тектонического нарушения

небольшой по мощности переходный слой между земной корой и верхней мантией.

На всех построенных разрезах глубинного строения граница типа Мохо характеризуется наибольшей дифференциацией — на ней зафиксированы выступы и углубления достаточно большой амплитуды.

Необходимо отметить и то обстоятельство, что в некоторых точках диаграммами зондирования на уровне глубин мантии также фиксируются геоэлектрические неоднородности.

На профиле через пролив Дрейка зафиксированы две границы типа Мохо на различной глубине. Здесь же переходной слой между нижней корой и верхней мантией фиксируется не всеми диаграммами зондирования.

Из-за значительной громоздкости рисунков в качестве иллюстрации на рис. 5 приводится только один разрез глубинного строения, вдоль профиля 3 (рис. 5), совмещенный с разрезом по фактическим материалам.

Для него в полной мере характерны отмеченные выше особенности. Здесь в земной коре достаточно уверенно прослеживается шесть крупных слоев, по дополнительным вариациям на диаграммах зондирования могут быть выделены геоэлектрические неоднородности второго порядка. На рис. 5 достаточно четко фиксируется переходной слой между земной корой и верхней мантией, а вариации границы типа Мохо превышают 16000 м. В районах расположения подводных вулканических комплексов фиксируются подъемы этой границы. Результаты интерпретации вдоль других интересных профилей после анализа и сопоставления с имеющимися геолого-геофизическими данными и материалами будут представлены в следующих наших публикациях.

О достоверности глубинных разрезов. Выполненные в Антарктическом регионе вертикальные электрорезонансные зондирования на большие глубины — это первый опыт практического применения глубинной модификации технологии ВЭРЗ; до этого проводились только тестовые зондирования в Киеве. К сожалению, до настоящего времени еще не проведены опытные исследования с этой модификацией ВЭРЗ вдоль сейсмических профилей ГСЗ с целью сопоставления данных зондирования с сейсмическими разрезами для оценки достоверности и информативности получаемых результатов. Тем не менее, следующие очевидные факты и обстоятельства в целом свидетельствуют, скорее всего, об информационной ценности и непротиворечивости полученной новой информации о геологическом строении региона, чем о ее неадекватности реальной геологической ситуации.

1. Оценивая полученные материалы с геологической точки зрения в целом, можно констатировать, что результаты интерпретации данных зондирования — геоэлектрические разрезы глубинного строения — не противоречат здравому геологическому смыслу, другими словами — явно не выглядят нереальными.

2. Важным свидетельством в пользу адекватности полученных моделей является наличие выделенного по данным ВЭРЗ переходного слоя между нижней частью земной коры и верхней мантией. Нелишне напомнить, что в 80-90 гг. прошлого столетия проблема переходного слоя в пределах континентов очень бурно дискутировалась сейсмометристами и гравиметристами. В этой связи нетрудно вспомнить часто звучавшие в то время на различных конференциях и семинарах выражения типа “слоеный пирог”, “две границы Мохо”, “система отражающих площадок” и т.д.

3. В пользу адекватности геоэлектрических построений свидетельствует также уверенная корреляция подъемов мантии (границы Мохо) с зонами

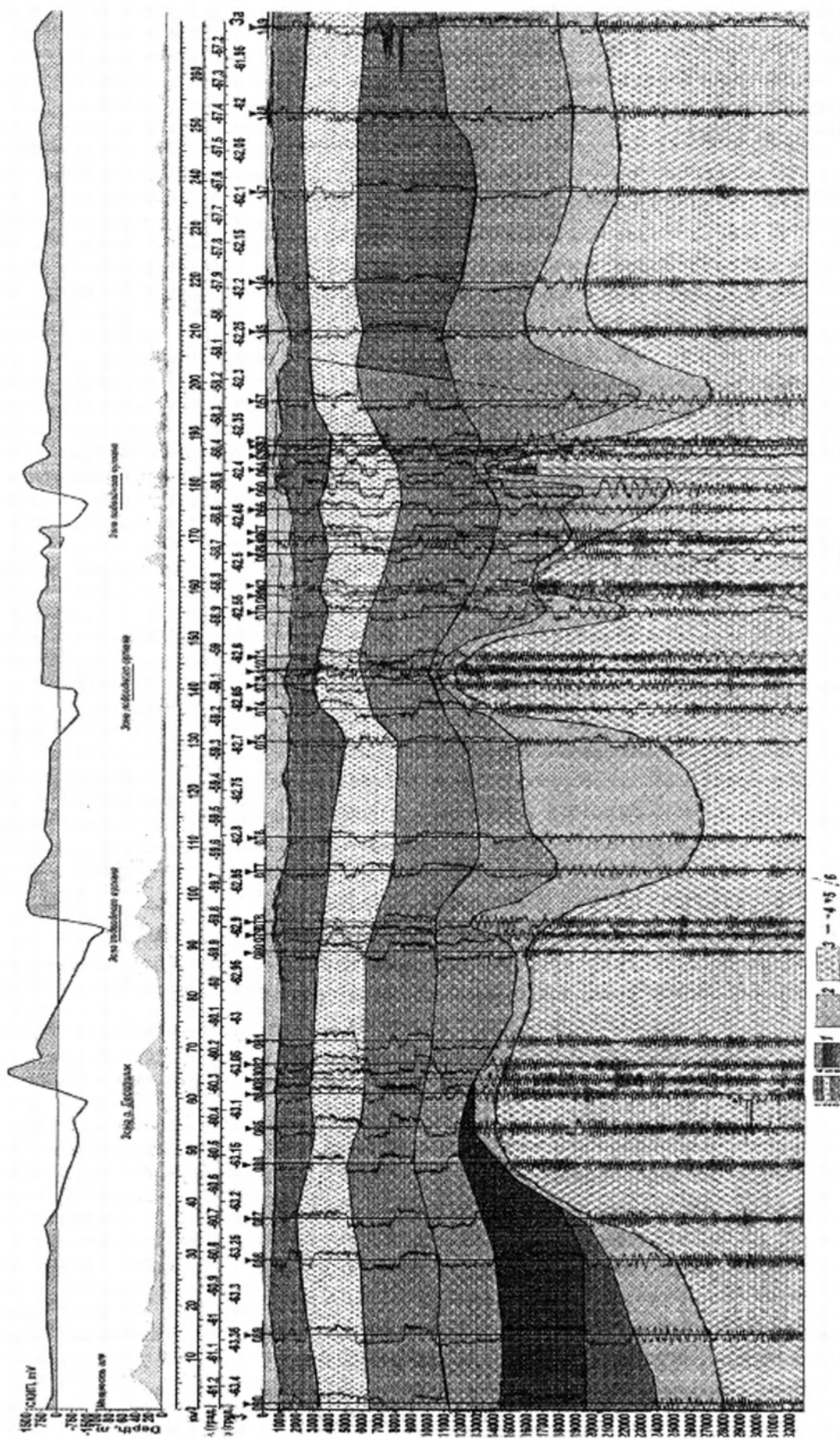


Рис. 5. Графическое представление данных геоэлектрических исследований методами СКИП и ВЭРЗ (график изменения поля СКИП и диаграммы ВЭРЗ) и схематическая модель глубинного строения земной коры вдоль профиля 3 в проливе Брансфилд. 1 — комплекс эффузивных и кристаллических пород; 2 — породы переходного слоя "кора-мантия"; 3 — породы верхней мантии; 4 — граница Мохо; 5 — пункты ВЭРЗ; 6 — тектонические нарушения.

расположения серии подводных вулканических комплексов в пр. Брансфилда. К тому же, положение подводных вулканов уверенно фиксируются также высокоградиентными зонами смены знака аномальных значений СКИП. Напомним, что такой же характер аномального поля СКИП был зафиксирован геоэлектрической съемкой СКИП в районе вулканического комплекса о. Десепшн в УАЭ 2004 г., а в 2005 г. — в районе грязевых вулканов Джау-Тепе и Андрусова на Керченском полуострове в Крыму.

4. Предварительный анализ глубин расположения границы Мохо в пр. Брансфилда показал, что в принципе они совпадают с глубинами, установленными в этом районе испанскими геофизиками по данным сейсмических исследований.

Обсуждение результатов

Результаты применения экспресс-технологии геоэлектрических исследований СКИП-ВЭРЗ в сезонных работах 9-й и 11-й Украинских антарктических экспедиций еще раз подтвердили оперативность, мобильность и эффективность входящих в эту технологию отдельных методов при решении разнообразных геолого-геофизических задач. Практический опыт проведения работ в антарктическом регионе способствовал становлению и совершенствованию технологии СКИП-ВЭРЗ. В связи с этим отметим следующие важные моменты.

1. В антарктических экспедициях отработаны основные методические вопросы, технические аспекты и технологические нюансы проведения измерений аппаратурными комплексами СКИП и ВЭРЗ в море с борта судна. В процессе работ практически решен комплекс задач, таких как: а) оптимального размещения на борту судна регистрирующей аппаратуры, а также генераторной и приемной антенн; б) выявления и устранения наводок и помех судового оборудования и радиоэлектронной аппаратуры на измерительные каналы приборов; в) разработки программного интерфейса для оперативного использования в процессе измерений данных, регистрируемых судовыми измерительными комплексами (в частности показания эхолотов); г) создания программного обеспечения для регистрации и предварительной обработки результатов измерений.

2. Исследования на малом леднике о. Галиндез и леднике Уиггинз на Антарктическом полуострове продемонстрировали высокую эффективность метода ВЭРЗ при решении задачи определения мощности ледникового покрова, и тем самым наметили еще одно перспективное направление применения технологии.

3. В акваториях Антарктического полуострова впервые маршрутной съемкой СКИП закартирована аномалия типа “залежь”, а зондированием ВЭРЗ в интервале этой аномалии выделены аномально-полярисованные пласты типа “залежь углеводородов”. Это обстоятельство свидетельствует, с одной стороны, не только о принципиальной, но и практической возможности применения технологии СКИП-ВЭРЗ при поисках и разведке скоплений УВ в Черном и Азовском морях. С другой стороны, имеются веские основания констатировать, что в стратегии исследований Украины в антарктическом регионе целесообразно формулировать и выполнять в сезонных

работах более конкретные и целенаправленные программы поисков как минерально-сырьевых ресурсов, так и горючих полезных ископаемых.

4. Геоэлектрические исследования в океанических и морских акваториях продемонстрировали высокую эффективность метода ВЭРЗ при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии, чем предопределили еще одно принципиально важное направление применения технологии, дальнейшее развитие которого сулит существенный прогресс в повышении эффективности площадных региональных геолого-геофизических исследований.

Приведенный в статье список литературных источников в полной мере характеризует класс задач, при решении которых технология СКИП-ВЭРЗ может найти свое применение. Существенную отдачу от ее активного использования следует ожидать, в первую очередь, в задачах поисков и разведки скоплений УВ. Авторы неоднократно отмечали в публикациях, что включение этой технологии в традиционный комплекс геолого-геофизических методов поисков и разведки месторождений УВ может способствовать существенному повышению в целом экономической эффективности и информационной содержательности геологоразведочных работ на нефть и газ как на суше, так и в морских акваториях. Это обусловлено тем обстоятельством, что экспресс-технология СКИП-ВЭРЗ позволяет на этапе рекогносцировочных работ оперативно, в сжатые сроки обследовать значительные по площади территории (акватории) с обнаружением и картированием на них аномалий типа “залежь” — ограниченных по размерам и наиболее перспективных участков для детальных геолого-геофизических работ (в первую очередь сейсморазведки 3D) и бурения. Тем не менее, в дополнение к этому мы все-таки акцентируем внимание на некоторых принципиальных проблемах и направлениях дальнейшего применения технологии.

Одна из проблем — это перспективы и преимущества комплексирования технологии с другими геофизическими методами исследований. И в первую очередь — с сейсморазведочными методами изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии. В этом направлении ведущим является метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Исследования с помощью ГСЗ осуществляются в основном вдоль отдельных профилей, что дает возможность строить только двумерные разрезы глубинного строения. В настоящее время построение трехмерных моделей земной коры и верхней мантии осуществляется, в основном, путем гравитационного моделирования. Трехмерные плотностные модели, которые строятся при этом, базируются и жестко привязываются к двумерным скоростным моделям, построенным по данным ГСЗ. Успешный опыт практического применения глубинной модификации ВЭРЗ в антарктическом регионе свидетельствует о реальной возможности и целесообразности комплексирования метода ГСЗ, гравиметрии и технологии СКИП-ВЭРЗ для построения трехмерных моделей строения земной коры и верхней мантии. При этом построенные геоэлектрические разрезы могут использоваться в качестве модели первого приближения при моделировании скоростей распространения сейсмических волн в отдельных слоях. Геоэлектрический слоистый разрез может также служить моделью первого приближения при построении по гравита-

ционными данным плотностной модели региона методом гравитационного моделирования.

Наполнение слоисто-блоковой геометрической модели глубинного строения, построенной по данным ВЭРЗ, реальными физическими свойствами может быть реализовано путем проведения зондирований в районе пробуренных параметрических скважин с последующей привязкой отдельных интервалов диаграммы зондирования (т.е. выделенных по данным зондирования геометрических слоев) к соответствующим стратиграфическим горизонтам разреза скважины для верхней части. Для глубинной части разреза и площадей, на которых параметрические скважины отсутствуют, такое наполнение может осуществляться в комплексе с сейсмометрией, гравиметрией, магнитометрией и другими геофизическими методами.

Целесообразно отметить, что имеется практический опыт построения с использованием технологии СКИП-ВЭРЗ трехмерной модели осадочного чехла и поверхности кристаллического фундамента на одном из перспективных на углеводороды участков площадью свыше 600 км² в Причерноморском регионе. Последовательность действий здесь была следующей. На площади в районах двух пробуренных параметрических скважин выполнено зондирование ВЭРЗ, что позволило связать отдельные интервалы диаграмм зондирования с установленными по данным бурения стратиграфическими горизонтами разреза, представляющими интерес в плане обнаружения УВ. Впоследствии по данным зондирования эти горизонты, а также глубины залегания поверхности кристаллического фундамента были прослежены по всей площади исследований и сопоставлены с закартированными съемкой СКИП геоэлектрическими аномалиями типа “залежь”.

Еще одна проблема — изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии в морях и океанах. Технология выполнения сейсмических исследований в акваториях существенно сложнее и дороже по сравнению с наземными исследованиями, ввиду чего объем таких работ незначителен. Поэтому здесь существенно большее применение может получить комплексирование технологии СКИП-ВЭРЗ с гравиметрией и магнитометрией. В результате слоистые геоэлектрические разрезы вдоль профилей в морских акваториях, построенные по данным ВЭРЗ, могут использоваться для формирования моделей первого приближения при плотностном моделировании или же при построении магнитных моделей. Процесс построения плотностных и магнитоактивных моделей методами компьютерного моделирования гравитационных и магнитных полей будет способствовать наполнению слоистых геоэлектрических разрезов некоторыми физическими характеристиками.

В связи с исследованиями в акваториях отметим еще одно немаловажное обстоятельство. В 11-ой УАЭ арендованное судно для доставки зимовщиков и участников сезонных работ использовалось, в основном, как перевозчик. Можно также согласиться с тем, что все члены экспедиции (в том числе и отряд геоэлектрических исследований) были “пассажирами” судна. Следовательно, глубинные геоэлектрические исследования с использованием технологии СКИП-ВЭРЗ можно с таким же успехом осуществлять на любом торговом, пассажирском или даже круизном судне. Последнее обстоя-

тельность позволяет существенным образом снизить стоимость выполнения морских глубинных геоэлектрических работ, с одной стороны, и открывает широкие перспективы для изучения глубинного строения Мирового океана, с другой.

Проблема усовершенствования и модернизации экспресс-технологии СКИП-ВЭРЗ еще не исчерпана до конца. Выше мы уже отмечали, что по времени процесс зондирования в одной точке до 32000 м занимает в среднем 20 минут. Такой временной интервал обусловлен, в основном, возможностями применяемого в регистрирующем канале измерительного комплекса алфавитно-цифрового преобразователя (АЦП). Замена используемого АЦП на существующий в настоящее время сверхбыстродействующий сулит значительное сокращение временного интервала зондирования в отдельной точке, а, следовательно, и повышение оперативности технологии ВЭРЗ.

Важной, по мнению авторов, является проблема экспериментального опробования в самое ближайшее время возможности применения технологии СКИП-ВЭРЗ с борта летательного аппарата. В случае положительного результата таких экспериментов оперативность и эффективность геоэлектрических методов повысится существенным образом.

Выводы

Оперативность и мобильность технологии СКИП-ВЭРЗ в целом, а также компактность, легкость и транспортабельность компьютеризированных регистрирующих аппаратных комплексов делают эту технологию в принципе востребованной (а может даже и незаменимой) при проведении сезонных геолого-геофизических исследований в Украинских антарктических экспедициях. Можно с большой долей уверенности констатировать, что никакой другой метод геофизических исследований не дает возможности получить такой объем новой информации при таких (минимальных) материальных затратах и за такие жесткие (существенно ограниченные) временные интервалы.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность и признательность директору Института геологических наук НАНУ П.Ф. Гожику, директору Института геофизики НАНУ В.И. Старостенко за предоставленную возможность проведения полевых (морских) геоэлектрических исследований в Антарктическом регионе в 9-й (2004 г.) и 11-й (2006 г.) Украинских антарктических экспедициях в составе отрядов сезонных работ от перечисленных институтов. Это способствовало получению новой (может быть даже и уникальной) геолого-геофизической информации о глубинном строении региона с одной стороны, а также разработке инновационной (прорывной) технологии геофизических исследований, с другой.

1. Боковой В.П., Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин І.М. Технологія картування зсувних ділянок та зон підвищеного обводнення ґрунтів комплексом геофізичних методів // Геоінформатика.— 2002.— № 4.— С. 31-34.

2. Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин І.М., Таскінбаев К.М. Технологія прямих пошуків покладів вуглеводнів геоелектричними методами та результати її застосування на нафтогазових родовищах Західного Казахстану // Геоінформатика.— 2002.— № 3.— С. 15-25.

3. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Пищаный Ю.М., Корчагин И.Н. Аппаратурный комплекс "GEMA" комплексных геоэлектрических исследований и его использование для поисков скоплений углеводородов. Сборник научных трудов НГА Украины № 13, Том 4.— Днепропетровск: РИК НГА.— 2002.— С. 78-83.

4. Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин И.М., Пищаный Ю.М. Метод электро-резонансного зондирования та його можливості при проведенні комплексних геолого-геофізичних досліджень // Геоінформатика.— 2003.— № 1.— С. 15-20.

5. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Электрорезонансное зондирование и его использование для решения задач экологии и инженерной геологии // Геологический журнал.— 2003.— № 4.— С. 24-28.

6. Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин И.М. Технологія прямих пошуків та розвідки покладів вуглеводнів геоелектричними методами: результати, можливості та перспективи // Геолог України.— 2003.— № 3-4.— С. 60-70.

7. Левашов С.П. Геофізичні дослідження інженерно-геологічних та гідрологічних умов на території Софійського собору в Києві // Геоінформатика.— 2004.— № 1.— С. 32-35.

8. Левашов С.П., Якимчук М.А., Усенко В.П., Корчагин И.М., Соловійов В.Д., Пищаный Ю.М. Визначення потужності льодовика острова Галіндез в районі антарктичної станції "Академік Вернадський" методом електро-резонансного зондування // Геоінформатика.— 2004.— № 2.— С. 50-54.

9. Левашов С.П. Поиски и картирование водоносных горизонтов геоэлектрическими методами // Геоинформатика.— 2004.— № 4.— С. 55-57.

10. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др. Экспресс-технология "прямых" поисков и разведки скоплений нефти и газа геоэлектрическими методами: результаты применения на газоперспективных участках в Днепроовско-Донецкой впадине (Полтавская область) // Геолог Украины.— 2005.— № 1.— С. 43-54.

11. Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин И.М. та ін. Про можливість виявлення та картування зон підвищеного газонасичення вугілля та гірських порід геоелектричними методами // Геоінформатика.— 2005.— № 3.— С. 19-23.

12. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М. Изучение строения кристаллического массива геоэлектрическими методами в восточной части Коростенского плутона // Геоинформатика.— 2005.— № 4.— С. 20-23.

13. Левашов С.П., Антипов И.В., Дегтярь Р.В., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Определение и картирование зон повышенного содержания метана в пределах шахтного поля шахты "Суходольская-Восточная" / Тезисы докладов "Восьмые геофизические чтения имени В.В. Федынского".— Москва, 2—4 марта 2006.— Москва, 2006.— С. 70.

14. Старостенко В.И., Рыбин В.Ф., Джепо С.П., Звольский С.Т., Кендзера А.В., Кожан Е.А., Корчагин И.Н., Кулик В.В., Левашов С.П., Омельченко В.Д., Скальский А.С., Черный Г.И., Бондаренко М.С., Ситникова В.А. Национальный заповедник "София Киевская": геолого-геофизический мониторинг и его результаты // Геофиз. журнал — 2005.— № 3, т. 27.— С. 335-368.

15. Якимчук Н.А., Левашов С.П., Корчагин И.Н. Рекогносцировочные геоэлектрические исследования в районе вулканов / В сб.: Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики.— Київ, 2006.— С. 257-265.

16. Vokovoy V.P., Levashov S.P., Yakymchuk M.A. Korchagin I.N., Yakymchuk Ju.M. Mudslide area and moistening zones mapping with geophysical methods on the slope of the Dniپر river in Kyiv // Extended abstracts book. Volume 2. 65nd EAGE Conference and Technical Exhibition. Stavanger, Norway, 2 — 5 June 2003. Poster presentations. Absr. P208, 4 pages.

17. Levashov S.P., Yakymchuk M.A. Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M., Yakymchuk Ju.M. Electric-resonance sounding method and its application for the ecological, geological-geophysical and engineering-geological investigations. 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition. Paris, France, 7 — 10 June 2003. CD-ROM Abstracts volume.

18. *Levashov S.P., Yakymchuk M.A. Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M., Yakymchuk Ju.M.* Geophysical investigations on the Sophia Kyivska cathedral territory in Kyiv. Near Surface 2004 — 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands, 6 — 9 September 2004. Extended Abstracts Book & CD-ROM Abstracts volume. P033, 4 pages.

19. *Levashov S.P., Yakymchuk M.A. Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M.* Oil polluted zones mapping by geoelectric methods. Near Surface 2004 — 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands, 6 — 9 September 2004. Extended Abstracts Book & CD-ROM Abstracts volume. P002, 4 pages.

20. *Levashov S.P., Yakymchuk M.A. Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M., Yakymchuk Ju.M.* Increased water containing rocks zones searching and mapping by geoelectric methods. Near Surface 2004 — 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands, 6 — 9 September 2004. Extended Abstracts Book & CD-ROM Abstracts volume. P055, 4 pages.

21. *Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M., Yakymchuk Ju.N.* The searching and mapping the water-saturated rock by geoelectric methods. 67nd EAGE Conference and Technical Exhibition. Madrid, Spain, 13 — 16 June 2005. CD-ROM Abstracts volume.

22. *Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Solovyov V.D., Pyschaniy Ju.M.* Geoelectric investigations of crustal inhomogeneities at the Antarctic Peninsula area. The 4th Balkan Geophysical Congress — International Conference of Applied Geophysics and Earth Physics, Bucharest Romania, 9-12 October 2005. Extended Abstracts compact disk. 4 pages.

Представлені результати геоелектричних досліджень 2006 р. в районі Антарктичного півострова. Уперше визначені потужність льодовика Уїггінз на самому півострові, а також аномалія типу “поклад” в акваторіях поблизу нього. В околі УАС “Академік Вернадський”, в протоках Брансфілда та Дрейка виконано понад 150 зондувань до глибини 32000 м, які дозволяють побудувати глибинні розрізи земної кори регіону. Глибинну модифікацію методу вертикального електронезонансного зондування доцільно активно використовувати як при проведенні геолого-геофізичних досліджень в Антарктичному регіоні, так і при вивченні глибинної будови земної кори та верхньої мантії в комплексі з іншими геофізичними методами.

The 2006 year geoelectric investigations data in the Antarctic peninsular region are given. The thickness of Wiggins glacier on peninsular was determined for the first time and “deposit” type anomaly was discovered in near lying area of water. Over 150 soundings for 32000 m depths were realized in the UAS “Academician Vernadskiy” vicinity, in the Bransfield strait and Draik Passage. These data permit to construct the deep cross-section of the region Earth crust. It is necessary to use more actively the deep modification of method of vertical electric-resonance sounding as during geological-geophysical investigations in the Antarctic region, so and for studying the deep structure of the Earth crust and upper mantle in integration with others geophysical methods.