

А. А. Жамалетдинов, А. С. Семенов

ГЕОИСТОРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ

Геоисторический подход к анализу геофизических явлений предполагает выяснение связей и закономерностей наблюдаемых физических полей, а также свойств вещества Земли и ее оболочек в тесной связи с составом и строением горных пород, геологическими процессами и эволюцией Земли в геологическом масштабе времени. Благодаря дистанционности применяемых методов исследований геофизика обладает широкими возможностями для изучения объектов и явлений, недоступных непосредственному геологическому изучению. Многие основополагающие представления в геофизике получены на базе геофизических исследований, прежде всего данных гравиметрии, сейсмологии и геотермии.

Геофизика как наука о физических свойствах вещества Земли обретает смысл и практическое значение при условии тесной связи с геологией. Предметом исследований геофизики являются физические поля, свойства и процессы в различных геосферах Земли, но окончательным результатом геофизических исследований является геологическое истолкование данных в тесной связи с составом, строением и историей развития соответствующих регионов, областей и оболочек Земли. Яркими примерами геолого-исторического значения обнаруживаемых геофизических явлений могут служить исследования по радиоизотопии тяжелых и летучих элементов, позволяющие изучать возраст и эволюцию Земли, работы по изучению полосовидных магнитных аномалий, положившие начало исследованиям в области новой тектоники плит и теории инверсии геомагнитных полюсов [1] и др. Геолого-исторический анализ результатов геофизических исследований в области гравиметрии, магнитометрии и геоэлектрики дан в работах [2, 3]. Настоящая статья является продолжением этих исследований в применении к проблемам глубинной геоэлектрики.

История глубинных электромагнитных исследований земной коры берет начало с 1946 г., когда по инициативе и под руководством профессора Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) университета А. П. Краева было выполнено первое глубинное зондирование в Финском заливе и на Карельском перешейке [4]. Применялась дипольная установка с неподвижной питающей линией длиной 1,5 км, погруженной в море и заземленной по концам. Мощная батарея аккумуляторов обеспечивала в линии импульсный ток силой до 1000 А. На кривых зондирования, проводившегося по морской и сухопутной трассам до разносов 64 и 75 км, соответственно, было отмечено снижение сопротивления на разносах, превышавших 40 км. Формальная (одномерная) интерпретация результатов указывала на присутствие хорошо проводящего слоя пород на глубинах 10–20 км. При геологическом истолковании результатов мнения разделились. А. П. Краев предложил связывать природу слоя с влиянием увеличивающейся с глубиной температуры [4]; А. С. Семенов был склонен связывать природу слоя с присутствием электронно-проводящих пород, характеризующих особые условия геологического строения земной коры [5]. Таким образом, уже первые результаты глубинных электромагнитных исследований показали сложность и неоднозначность истолкования геологической природы аномальных явлений и породили дискуссию о природе коровых аномалий электропроводности, продолжающуюся по настоящее время.

Тем не менее, выполненные работы показали возможность изучения глубинного электрического разреза земной коры с использованием мощных контролируемых источников. Основное значение результатов состояло в том, что они послужили стимулом и основанием для широкого развития глубинных исследований в СССР и за рубежом. По представлению А.П. Краева Советом Министров СССР была утверждена обширная программа глубинных исследований, включавшая, наряду с геоэлектрикой, постановку работ методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ).

50–60-е гг. XX в. характеризовались быстрым развитием техники и методики глубинных электромагнитных зондирований и обширными экспериментальными исследованиями. При этом применялись магнитотеллурический метод [6–8], методы дипольного и симметричного зондирования [9], наблюдения поля длинных заземленных линий [10], метод частотного электромагнитного зондирования [11]. Среди других методов наибольшее развитие получил магнитотеллурический метод, обладающий наибольшей глубиной и экспрессностью наблюдений [12]. Одним из главных результатов электромагнитных зондирований, установленным к настоящему времени, явилось обнаружение резкой электрической неоднородности земной коры; были выявлены и прослежены протяженные зоны и пояса повышенной и высокой электропроводности в земной коре, проявляющиеся при формальной интерпретации в виде так называемых промежуточных проводящих слоев на глубинах в первые десятки километров, аналогично слою, обнаруженному в районе Финского залива. Это свойство глубинной электрической неоднородности земной коры имеет планетарный масштаб распространения.

Коровые аномалии электропроводности, с одной стороны, выступают как искажающий фактор, препятствующий изучению электропроводности более глубоких горизонтов Земли, и, с другой стороны, являются индикаторами особых условий геодинамического развития и физического состояния соответствующих блоков литосферы. В этом отношении они представляют интерес как объект специального исследования при решении вопросов фундаментальной и прикладной геологии. Как отмечалось выше, коренной проблемой интерпретации результатов глубинных зондирований является решение вопроса о природе коровых аномалий электропроводности, поскольку прежде всего этим определяется их значение в изучении геологического строения, состава и эволюции глубинных областей Земли. Если отвлечься от отдельных деталей, то по данной проблеме выделяются две основополагающие концепции, дополняющие друг друга, — флюидная и электронно-проводящая.

Концепция флюидной природы коровых аномалий в той или иной мере основана на учете влияния на электропроводность пород возрастающей с глубиной температуры; в этом отношении она наследует идеи А. П. Краева. Наиболее полно флюидная концепция развита в работах [13–16]. В основе флюидной концепции лежит идея дегидратации горных пород; появления в глубинных слоях земной коры связанных систем поровых пространств, заполненных свободными соляными растворами, выделяющимися из кристаллической решетки пород под воздействием температуры.

Основным ограничением при отнесении коровых аномалий проводимости к флюидному типу является минимальное значение возможного удельного сопротивления слагающих их горных пород. Реальные расчеты пористости земного вещества на глубине и оценки удельного сопротивления флюидов дают минимальную величину сопротивления пород порядка 10 или даже 100 Ом·м на глубинах 10–20 км для зон молодого вулканизма с тепловым потоком 80–100 мВт/м² [16]. Важным косвенным критерием, определяющим возможность появления аномалий проводимости флюидной природы, является требование, чтобы на соответствующей глубине существо-

вала температура, необходимая для развития процессов дегидратации (400–600 °С). На щитах эта температура соответствует глубинам 40–50 км, а в зонах молодого вулканизма и рифтогенеза — 10–15 км [17]. Кроме того, из наиболее общих соображений необходимо предположить, что флюидные аномалии должны характеризоваться слабыми пространственными градиентами, умеренной анизотропией или ее отсутствием и значительными горизонтальными размерами, существенно превышающими глубину их залегания.

На практике коровые аномалии характеризуются зачастую крайне низкими значениями удельного сопротивления, в единицы и десятые доли омметров. Над ними редко наблюдаются повышенные тепловые потоки, а иногда наблюдаются пониженные или резко неравномерные температурные поля. Крайне неоднороден бывает и характер их проявления в электрических полях с явными чертами резкой анизотропии. В этих случаях при трактовке природы коровых аномалий принято прибегать к электронно-проводящей концепции.

Идея об электронно-проводящей природе коровых аномалий впервые была обоснована в работах [18, 19]. При этом предполагалось два возможных механизма электронной проводимости в земной коре. Первый связывался с предполагаемым повышением содержания ферромагнитных минералов в земной коре под действием возрастающей с глубиной температуры и высвобождением из ультрабазитовых пород нижней коры свободного магнетита и титаномангнетита в виде тонких межзерновых пленок. Эта идея трактовки природы коровых аномалий электропроводности еще ждет своей разработки. Она опирается лишь на отдельные геологические факты увеличения электропроводности ультраосновных пород благодаря развитию межзерновых пленок титаномангнетита, магнетита [20] и лабораторные данные высокотемпературных исследований, свидетельствующие об увеличении электропроводности железистых пород при нагреве за счет выделения магнетита [21].

Существенно более широкое распространение получила концепция, в которой предлагается связывать природу коровых проводников с графитистыми и сульфидно-графитистыми электронно-проводящими породами. С целью проверки этой гипотезы нами были исследованы строение, геологическая позиция и структура электропроводности графитистых и сульфидно-графитистых образований Балтийского щита, а также выполнены экспедиционные исследования в Центральной России, на Украинском щите и Воронежском кристаллическом массиве, в Восточном Забайкалье, в Казахстане и на Сахалине. В ходе этих исследований были выполнены глубинные зондирования с мощными контролируемыми и естественными источниками с целью изучения строения и особенностей проявления графитистых толщ в земной коре [22, 23].

Результаты этих исследований, а также обобщение данных большого числа публикаций послужили основанием для разделения выявленных на территории СНГ коровых аномалий на флюидные и электронно-проводящие [24]. При этом выяснилось, что в земной коре подавляющее большинство проводящих объектов, протяженность которых иногда достигает тысячи километров и более [25, 26], имеет электронно-проводящую, сульфидно-графитистую природу. Они широко развиты не только в породах докембрия, но и в фанерозойских отложениях, включая зоны альпийской складчатости [27]. Аналогичные зоны электронно-проводящих пород в земной коре протяженностью в сотни и свыше тысячи километров установлены и описаны в последнее время также на Северо-Американском континенте [28, 29]. Мы не будем далее останавливаться на рассмотрении строения и геологической позиции исследованных электронно-проводящих толщ и ниже приведем анализ основных

черт их распространения в геолого-историческом аспекте с целью выяснения их роли как индикаторов эволюции электропроводности литосферы.

С этой точки зрения основную роль играют следующие наиболее важные факты, установленные на основе экспериментальных наблюдений, проводившихся на территории восточной части Балтийского щита и на Русской платформе.

1. Основная масса электронно-проводящих образований в форме сульфидно-углеродистых пород разной степени метаморфизма от углистых сланцев зеленокаменных формаций до графитовых горизонтов в гнейсо-сланцевых комплексах гранулитовых серий приурочены к первично осадочным и осадочно-вулканогенным толщам пород. Они образуют системы проводимости разных рангов от микроскопических прослоев до крупных структурных элементов, охватывающих территории в тысячи квадратных километров и более. Носители высокой электронной проводимости — углистое вещество, шунгиты, графит, сульфиды железа — концентрируются в тонких слоисто-сланцеватых элементах разреза, образуя вместе с ними согласные тонко вытянутые анизотропные системы проводимости.

Весь комплекс наших исследований, проводившихся от микроскопических объемов до масштабов крупных блоков земной коры, в наибольшей мере согласуется с точкой зрения, основанной на идее о первично-осадочном, биогенном происхождении углисто-графитовых толщ [30, 31]. Согласно этой концепции, на раннем этапе развития Земли произошло резкое изменение характера геологических процессов в связи с дегазацией мантии, появлением атмосферы, гидросферы и фотосинтезирующих бактерий [32]. С этого рубежа возникла и начала активно развиваться органическая жизнь, преимущественно в мелководных бассейнах, где накапливалось и захоронялось органическое вещество. Одновременно эти области испытывали воздействие длительного регионального прогрессивного метаморфизма на фоне интенсивной геологической деятельности, сопровождавшейся обширными погружениями, дизъюнктивными тектоническими движениями, осадконакоплением и эрозионными явлениями.

Глубокий метаморфизм приводил к удалению летучих элементов и к структурной перестройке вещества. Богатые сероводородом органические остатки преобразовывались в характерные переслаивающиеся пачки сульфидно-углеродистых пород [30, 33]. Описанная область крупных геологических преобразований земного вещества, обусловленных биогеохимической и вулканической деятельностью, получила название супраструктуры (по Седергольму), а соответствующие геологические комплексы — название супракрустальных, или залегающих на первичной коре наиболее раннего, нуклеарного этапа развития Земли.

В качестве иллюстрации описанным явлениям на рис. 1, а приведена схема размещения электронно-проводящих пород на территории восточной части Балтийского щита. На ней заштрихованными участками показаны области регионального понижения сопротивления отдельных блоков земной коры, установленные по данным глубинных электромагнитных зондирований с естественными и контролируемыми источниками. Пространственно коровые аномалии электропроводности совпадают с областями развития супракрустальных комплексов, в пределах которых понижение сопротивления земной коры происходит за счет "пропитки" кристаллической матрицы силикатных пород тончайшей сетью зон и полос электронно-проводящих образований. Зоны и полосы проводимости, легко устанавливаемые по данным наземной и аэроэлектроразведки, имеют бесконечно усложняющуюся по мере уменьшения объемов исследований структуру. В этом отношении они обладают характерными признаками фрактальных структур и по своему строению и особенностям распростра-

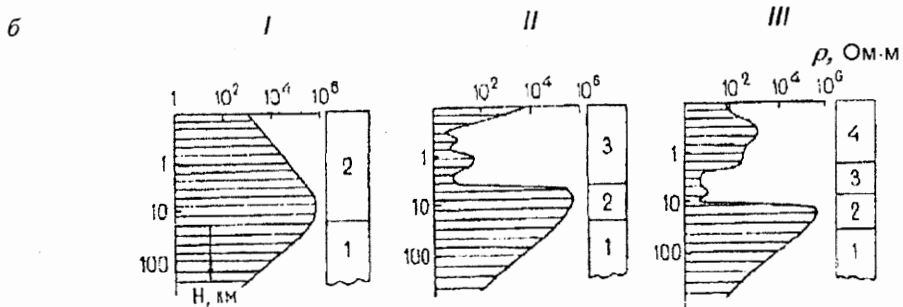
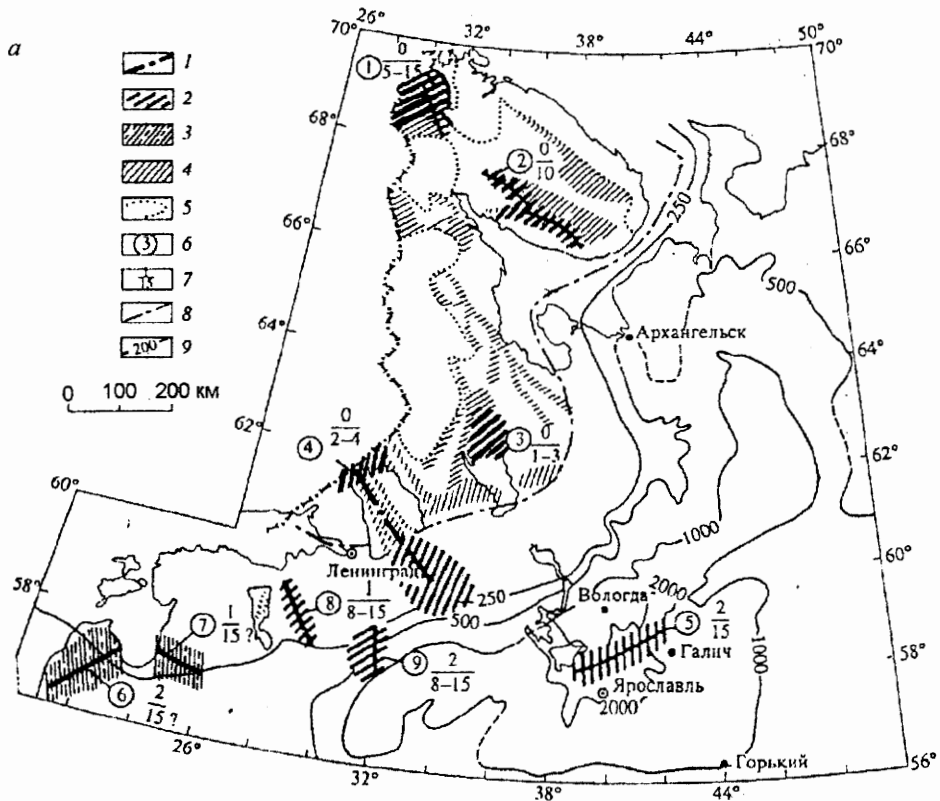


Рис. 1. Схема электропроводности земной коры в восточной части Балтийского щита и на прилегающей части Русской платформы [42] (*a*) и примеры типовых глубинных электрических разрезов (римские цифры) над разными геоблоками (*b*).

1 — оси мощных вытянутых аномалий электропроводности; 2-4 — проводящие блоки земной коры с различной величиной продольной проводимости: 2 — более 1000 См, 3 — 100-1000 См, 4 — 10-100 См; 5 — блоки высокого сопротивления, коррелируемые с выходами древнего основания (протофундамента); 6 — номера коровых аномалий электропроводности (1 — Печенего-Алареченская, 2 — Имандра-Варзугская, 3 — Онежская, 4 — Ладожская, 5 — Любимская, 6 — Кулдино-Лиепайская, 7 — Валмиеро-Локновская, 8 — Чудская, 9 — Ильменская); 7 — параметры коровых аномалий, в км: в числителе — глубина залегания верхней кромки, в знаменателе — ориентировочная глубина до наиболее проводящей части; 8 — границы Балтийского щита; 9 — изолинии продольной проводимости осадочного чехла, в сименсах. Цифры в колонках: 1 — проводящий (высокотемпературный) слой нижней коры и верхней мантии; 2 — плохопроводящий протофундамент; 3 — электропроводящие образования в составе супракrustальных комплексов (слой SC); 4 — осадочный чехол.

нения напоминают систему перколяционных кластеров, описанных для первично-осадочных и вулканогенных пород железорудных формаций докембрия П. М. Горьяновым и его коллегами [34].

2. Вторым важным фактом экспериментальных исследований явилось установление крайне высокого сопротивления наиболее древних блоков земной коры типа Мурманского, Центрально-Кольского, Центрально-Карельского. Средняя величина сопротивления земной коры в этих районах достигает значений $10^5 - 10^6$ Ом·м. Древнейшие блоки земной коры, кроме высокого сопротивления, отличаются высокой горизонтальной однородностью электрических свойств, свидетельствующей о значительной степени гомогенизации вещества. Имеющиеся отдельные локальные проявления электронно-проводящих пород, как правило, не влияют на общую структуру электромагнитного поля. При измерениях на больших разнотах и на низких частотах их влияние довольно быстро нивелируется. Поэтому такие проводники рассматриваются как останцы эрозионного среза, ниже которых электрическое сопротивление пород довольно быстро увеличивается до значений $10^5 - 10^6$ Ом·м.

Выделяемые по данным глубинных зондирований плохопроводящие однородные блоки земной коры мы относим к комплексу первичного основания, древнейшего протофундаменту условно нижнеархейского возраста, поскольку к ним, как правило, приурочены известные обнажения наиболее древних пород — гранитогнейсов, гранитов-тоналитов [35]. На рис. 1, а блоки земной коры высокого сопротивления (протофундамент) показаны белыми пятнами, окаймленными пунктирными линиями. Комплекс протофундамента характеризует наиболее ранний, нуклеарный этап развития Земли и является основанием для более молодых супракристалльных отложений верхнего архея и протерозоя [35].

3. Третьим и наиболее важным для разработки данной темы результатом экспериментальных исследований, полученным, главным образом, по данным глубинных зондирований с мощными контролируруемыми источниками, является обнаружение плохопроводящего, изолирующего основания, ограничивающего распространение электронно-проводящих образований на глубину. Это позволяет сделать вывод о "покровном" характере их залегания на поверхности плохопроводящего основания — древнейшего протофундамента.

Данный результат получен, прежде всего, по результатам дистанционных глубинных зондирований с МГД-источником "Хибины" и с промышленной ЛЭП постоянного тока 800 кВ "Волгоград — Донбасс" с разнотами до 600 км между источником и приемником [23]. По этим данным на кривых зондирования наблюдается монотонный рост кажущегося сопротивления по мере увеличения разнот, прерываемый отдельными глубокими понижениями сопротивления лишь на участках, где трассы пересекают крупные проводящие объекты типа Печенегской структуры на Кольском полуострове или Воронцовской толщи на Воронежском кристаллическом массиве [23]. Далее, по мере увеличения разнот, наблюдается быстрое исчезновение эффекта электромагнитного экранирования, указывающее на относительно неглубокое залегание проводящих блоков. При дальнейшем наращивании разнот на кривых дистанционных зондирований происходит дальнейший монотонный рост кажущегося сопротивления вплоть до разнот 400–600 км. Получаемая при этом оценка поперечного сопротивления земной коры T ($T = \rho \cdot h$, где ρ — удельное сопротивление и h — мощность земной коры) достигает величины 10 млрд Ом·м². Указанием в пользу залегания электронно-проводящих блоков в пределах верхней толщи земной коры являются также результаты большого числа опытов численного моделирования аномальных эффектов, наблюдаемых над коровыми проводниками

по магнитотеллурическим данным [36] и по данным зондирований с мощными контролируемыми источниками [37, 38].

Результаты исследований протяженности электронно-проводящих блоков на глубину отражены на рис. 1, где для наиболее крупных аномалий приведены оценки глубин до кровли и подошвы. Весь комплекс полученных результатов электромагнитных зондирований указывает на то, что электронно-проводящие блоки распространены лишь в верхней части земной коры и пространственно совпадают с областью развития супракrustальных — осадочных, осадочно-вулканогенных пород, подвергшихся интенсивному региональному метаморфизму. Ниже по разрезу фиксируется однородное плохопроводящее основание, которое мы связываем с древнейшим нижнеархейским протофундаментом. Его влияние как изолирующей границы для токов гальванической природы непрерывно прослеживается на всей территории Балтийского кристаллического щита и Русской платформы. При глубинных зондированиях комплекс древнего основания проявляется в виде квазиодномерного плохопроводящего полупространства с градиентным характером изменения сопротивления на глубину; его кровля обнажается или подходит близко к дневной поверхности в пределах раннеархейских кратонов и погружается до глубин 15–20 км и более в областях развития супракrustальных комплексов.

Эволюция электропроводности литосферы и характерные элементы электрического разреза

Стадия эволюции	Возраст, млрд лет	Состав	Преобладающий тип проводимости (ρ , Ом·м)	Преобладающий тип разреза	Примеры типовых структур
I. Нуклеарная	>3,5	Кислые и основные породы первичной коры нуклеарного типа	Ионный (10^5 – 10^6)	Горизонтально-слоистый	Мурманский, Центрально-Карельский блоки
II. Супракrustальная	0,6–3,5	Сульфидно-углеродистые породы в составе супракrustальных комплексов (зеленокаменные пояса, гнейсовые комплексы, кислые гранулиты и др.)	Полупроводниковый электронного типа (10^{-1} – 10^3)	Слоисто-блоковый	Печенегская, Ладожская, Кировоградская аномалии проводимости
III. Фанерозойская	<0,6	Углеродисто-графитовые толщи в составе переслаивающихся комплексов складчатых сооружений	Полупроводниковый электронного типа (10^{-1} – 10^2)	Слоисто-складчатый	Южно-Тяньшаньская, Карпатская аномалии проводимости

Представленные выше результаты экспериментальных исследований в совокупности с наиболее общими геологическими данными позволяют наметить схему эволюции электропроводности литосферы, проиллюстрированную на рис. 2 и предста-

вленную также в виде таблицы. Выделяются три стадии эволюции электропроводности литосферы.

Первая стадия — нуклеарная. Ей соответствует нижнеархейский период развития Земли (возраст — старше 3,5 млрд лет). На этой стадии сформировался электрически однородный плохопроводящий фундамент. Выходы протофундамент на дневную поверхность представляют собой “незамутненные” геологической неоднородностью области распространения однородных плохопроводящих пород. Такие “окна” протофундамента являются наиболее благоприятными территориями для глубинного зондирования литосферы с целью получения одномерной “нормальной” модели изменения удельного сопротивления пород на глубину. При последующей интерпретации “нормальная” модель может быть использована для изучения коррелируемых с электропроводностью других физических параметров литосферы, таких как температура, пористость, трещиноватость пород, содержание флюидов на глубине и др. Типовой пример “нормального” глубинного электрического разреза протофундамента показан на рис. 1, б (блок I) и на рис. 2 (I, нуклеарная стадия). Он характеризуется плавными, градиентными изменениями электропроводности с глубиной — ростом сопротивления до $10^5 - 10^6$ Ом·м на глубине порядка 10 км в связи с уменьшением содержания влаги в горных породах и затем постепенным (экспоненциальным) уменьшением сопротивления в связи с воздействием возрастающей с глубиной температуры.

Вторая стадия развития электропроводности литосферы — супракристаллическая. Она охватывает верхнеархейский, протерозойский и частично палеозойский этапы развития Земли. В начальной фазе второй стадии произошла дегазация Земли и образовались атмосфера и гидросфера. Характерной особенностью этой стадии является ее протекание в условиях интенсивного накопления осадочно-вулканогенных толщ и органических остатков живых организмов, подвергшихся затем глубокому региональному прогрессивному метаморфизму. Результатом этой геологической деятельности явилось широкое распространение электропроводящих пород. Последние образуют иногда мощные крутозалегающие полосы проводимости, вытянутые вдоль осадочно-вулканогенных поясов и рифтогенных структур типа Печенгской, Имандра-Варзугской и др., а иногда наблюдаются в виде обширных систем проводящих зон (поля и сети проводимости), понижающих сопротивление крупных блоков земной коры на площадях в десятки и сотни тысяч квадратных километров. Такие блоки могут иметь сопротивление от единиц до первых десятков и сотен омметров при мощности до 10–15 км.

Электронно-проводящие образования, возникшие на второй стадии эволюции литосферы, могут быть условно выделены в виде спорадически развитого SC-слоя (Sulphide and Carbon bearing layer). Термин “слой” в данном случае мы применяем лишь в силу ограниченных возможностей по расшифровке структуры глубинных аномалий электропроводности, имеющих расплывчатый характер в силу диффузионной природы применяемых электромагнитных полей. Понятие “SC-слой” имеет физический смысл в том отношении, что слагающие его электронно-проводящие образования приурочены к конкретным типам геологических структур, сформированных на определенном этапе развития Земли (0,6–3,5 млрд лет) и имеют ограниченное распространение на глубину — в пределах верхней толщи земной коры, между древнейшим протофундаментом и перекрывающими его более молодыми осадочными отложениями платформ.

Участки распространения SC-слоя показаны в виде заштрихованных областей на рис. 1, а и в виде слоя, занимающего верхнюю часть кристаллического фундамента

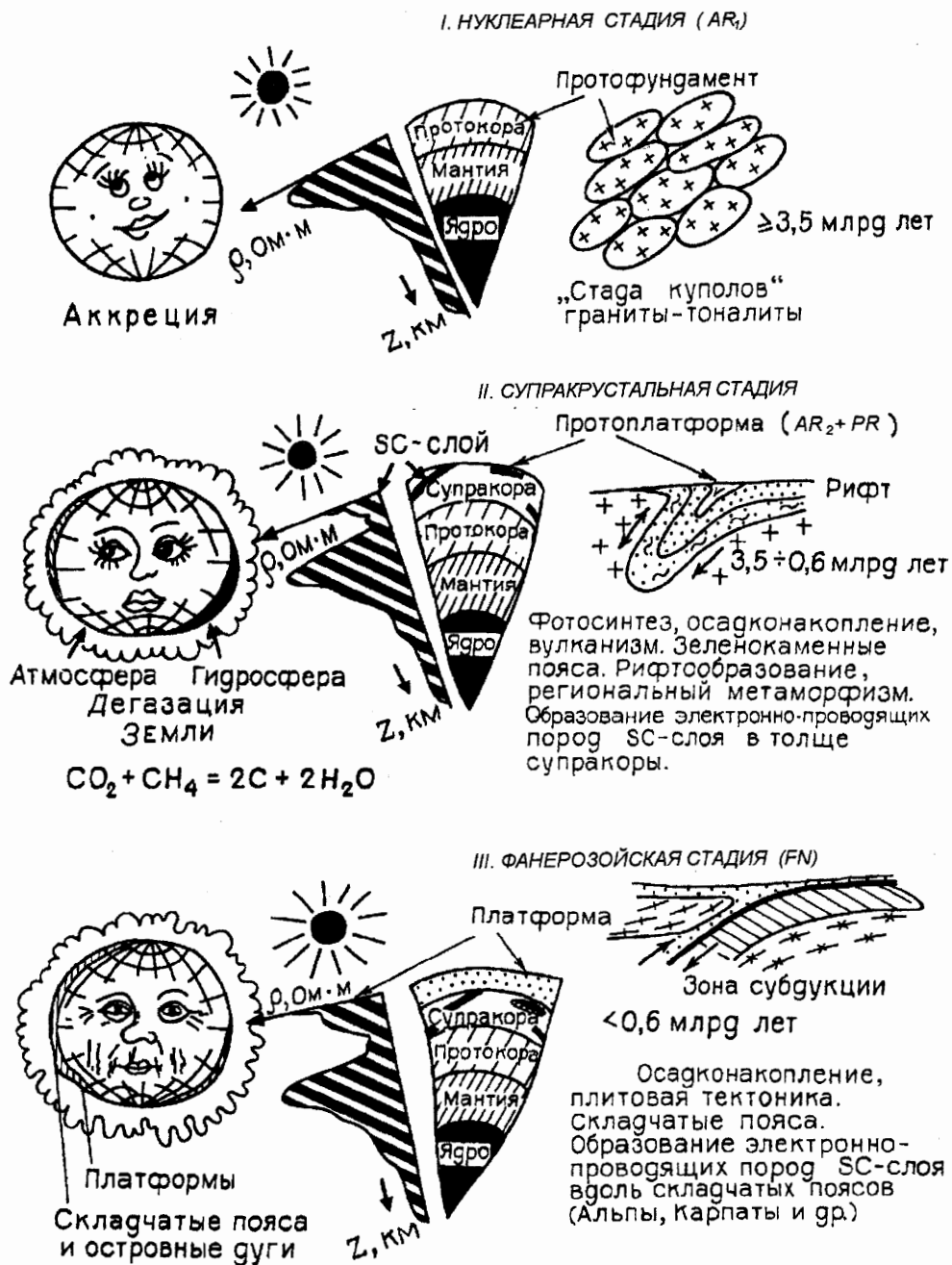


Рис. 2. Три стадии эволюции электропроводности литосферы.

на разрезе II на рис. 1, б. На рис. 1, а можно видеть, что SC-слой залегает также и под осадочными образованиями Русской платформы. Иногда проводящие блоки земной коры непосредственно прослеживаются с территории Балтийского щита на Русскую платформу, под осадочным чехлом, например, Ладожская аномалия проводимости [39]. При проведении зондирований на платформе образования SC-слоя наблюдаются в виде промежуточного проводящего слоя, как это показано на разрезе III на рис. 1, б и на рис. 2 (II этап).

Третья стадия развития электропроводности литосферы — фанерозойская. На этой стадии продолжалось осадкообразование и накопление органического углерода примерно с той же скоростью, что и в докембрии [31]. Однако в региональном плане отсутствовали условия интенсивного метаморфизма, необходимые для преобразования органического вещества в сульфидно-графитистую электронно-проводящую форму. Лишь в пределах отдельных складчатых поясов и коллизионных зон создавались условия высокотемпературного динамометаморфизма и тектонических воздействий, благоприятные для преобразования органического вещества в углитографитистые, сульфидсодержащие породы, обладающие высокой электронной проводимостью. Наиболее интенсивно эти процессы протекали в пределах поясов альпийской зоны складчатости. Примерами подобных структур могут служить такие мощные аномалии электропроводности, как Южно-Тянь-Шаньская (Мурунтауская), Карпатская, Пиренейская и др. За пределами этих аномалий в фанерозойском чехле не наблюдается крупных коровых проводников, если не принимать во внимание отдельные угленосные провинции типа Донбасской, Экибастузской и др., также обладающих высокой электронной проводимостью.

Таким образом, исследование глубинной электропроводности литосферы является комплексной задачей, требующей объединенного геолого-геофизического подхода. Сама постановка задачи электромагнитных исследований должна опираться на хорошее знание геологической обстановки и предварительное изучение электропроводности геологических объектов в приповерхностном срезе. На территории Балтийского щита эта предварительная работа в значительной мере выполнена [23–41]. Опираясь на имеющиеся сведения о блоковой структуре электропроводности земной коры и приведенный выше геолого-исторический анализ эволюции электропроводности литосферы, можно представить примерную схему объектов и решаемых задач глубинных зондирований в применении к Балтийскому щиту (схема).

Весь опыт предыдущих исследований указывает на низкую эффективность глубинных электромагнитных зондирований, выполняемых вдоль протяженных профилей и геотраверсов. В лучшем случае такие работы дают общую картину электрической неоднородности строения земной коры, поскольку, в отличие от сейсморазведки, глубинная геоэлектрика вследствие диффузионной природы применяемых электромагнитных полей обладает повышенной чувствительностью к влиянию горизонтальной (боковой) неоднородности пород. Спектр таких искажений чрезвычайно широк — от статических эффектов, создаваемых приповерхностными проводниками, до мощных индукционных и гальванических искажений по типу берегового эффекта, создаваемых электронно-проводящими структурами, осадочными бассейнами и морскими акваториями. Поэтому уже на стадии планирования необходимо определить методику работ, исходя из конкретных решаемых задач.

В общем случае задачи глубинных зондирований могут быть разделены на два направления — изучение глубинной электропроводности литосферы и астеносферы с целью решения фундаментальных проблем физики Земли (направление I на схеме) и изучение электропроводности земной коры для прикладных задач структурной и

рудопоисковой геологии (направление II).

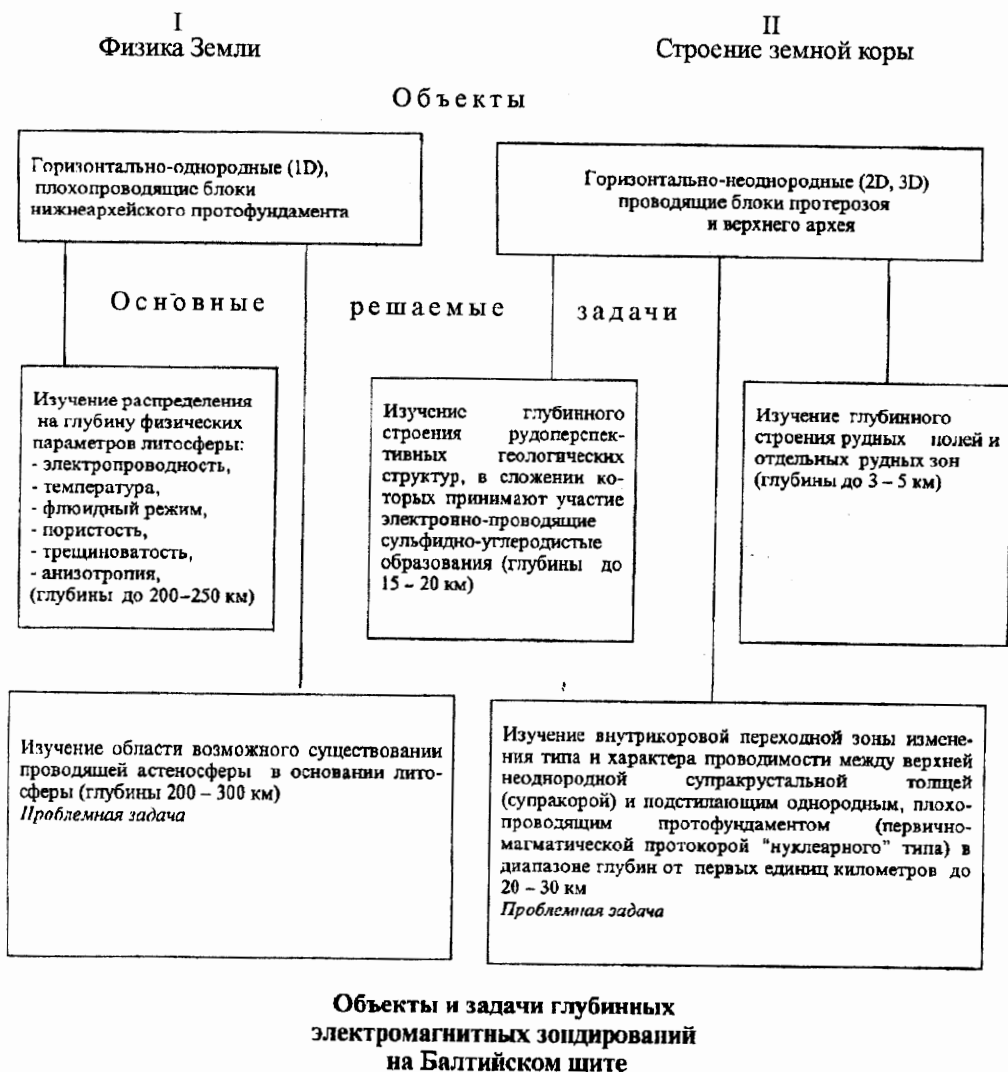
В плане решения фундаментальных задач физики Земли основным физическим параметром, определяющим глубинный электрический разрез, является температура. Дополнительными факторами, составляющими косвенную информацию, извлекаемую из данных об электрическом разрезе, являются пористость, флюидонасыщенность пород, давление. Электрический разрез в той мере, в какой он зависит от перечисленных выше параметров, имеет градиентный характер. Отсюда следует необходимость введения в качестве одного из главных компонентов интерпретационной модели глубинных зондирований градиентной модели среды и разработка методов решения обратной задачи геоэлектрики в классе градиентных моделей. Задача эта в значительной мере решена для магнитотеллурических зондирований [12] и находится в стадии разработки для зондирований с контролируруемыми источниками.

Выбор правильной геологической ситуации и оптимальной модели является необходимым, но не единственным условием успешного решения задачи построения глубинного электрического разреза. Это обусловлено двумя причинами — неоднозначностью решения обратной задачи зондирования, даже при правильном выборе интерпретационной модели, и влиянием горизонтальной неоднородности пород. Известно, например, что даже в случае горизонтально-слоистой среды однозначное определение мощности или сопротивления промежуточных слоев возможно только при условии, если известен по крайней мере один из этих параметров. При интерпретации глубинных зондирований возможность привязки, например, по данным опорных скважин, практически исключается. По этой причине большое значение приобретает привлечение косвенной геолого-геофизической информации. Но и в этом случае существенная неоднозначность и возможность альтернативных вариантов остаются [42].

Глубинные и сверхглубинные зондирования, как отмечалось выше, слудует выполнять в пределах однородных плохопроводящих блоков протофундамента, где возможности учета боковых искажений наиболее велики. При этом первостепенное значение приобретает проблема правильного определения так называемой “нормальной” кривой кажущегося сопротивления, отражающей характер глубинной электропроводности для конкретного региона (щит, платформа) в отсутствие влияния горизонтальной неоднородности пород. Направленные на эту задачу исследования должны носить площадной характер, а при анализе результатов особое внимание должно уделяться выяснению причин возможных отклонений кажущегося сопротивления в сторону низких значений, которые при формальной интерпретации зачастую определяются как промежуточные проводящие слои. Как правило, эти отклонения обусловлены горизонтальной неоднородностью пород. Даже в условиях однородных плохопроводящих блоков протофундамента устойчивые кривые зондирования с высокими значениями кажущегося сопротивления являются редкими “аномалиями”. Но именно они несут информацию о “нормальном” распределении сопротивления на глубину.

С учетом приведенных замечаний нами были осуществлены глубинные зондирования и выполнен их анализ на территории Карело-Кольского региона. Полученные кривые кажущегося сопротивления были использованы для построения осредненного “нормального” электрического разреза (кривая I на рис. 1, б). Представленный электрический разрез находится в хорошем согласии с имеющимися лабораторными данными и позволяет выполнять правдоподобные реконструкции термодинамических условий на глубине [23]. Однако необходимо отметить, что полученная “нормальная” кривая существенно, иногда на несколько порядков, отличается от анало-

гичного характера данных, полученных для Балтийского щита другими авторами [39, 43–45]. Наблюдаемые расхождения указывают на необходимость продолжения комплексных исследований в этом направлении с целью получения согласованных данных.



Второе направление глубинных зондирований (см. схему) связано с изучением локальных проводящих зон в земной коре. При любой трактовке их природы они представляют большой геологический интерес, поскольку несут информацию о строении как крупных геологических структур, так и отдельных рудоперспективных узлов и провинций. Выше нами приведены доводы в пользу их связи с электронно-проводящими породами, занимающими определенную геологическую позицию. Все они, за исключением локальных зон магматического и гидротермального происхождения, имеют первично-осадочную и осадочно-вулканогенную природу. Этим са-

мым устанавливается возможность обнаружения с помощью глубинных зондирований древних осадочно-метаморфических комплексов в толще кристаллического фундамента, что составляет важную геологическую задачу.

Основным компонентом электронно-проводящих образований являются графит и углеродистое вещество разной степени метаморфизма, имеющие органическое происхождение [31]. Отсюда следует, что выявление и прослеживание глубинных проводящих зон в земной коре является средством картирования древних ареалов распространения жизни на Земле. Преобразование первично-органического вещества в графит могло происходить в условиях достаточно высоких температурных и тектонических воздействий. Таким образом, глубинные зондирования выступают как эффективный метод геолого-исторических реконструкций [2], а электронно-проводящие породы — как основной объект глубинных зондирований [46].

Указатель литературы

1. Vine F. J., Matthews D. H. Magnetic anomalies over Oceanic Ridges // Nature. 1963. N 199. P. 947-949.
2. Семенов А. С. Геолого-исторический аспект геофизических исследований // Вестн. Ленингр. ун-та. 1980. № 18. С. 5-9.
3. Семенов А. С., Миронов В. С. Геофизические факты — источники идей в геологии и показатели геолого-исторических событий // Труды С.-Петербур. о-ва естествоиспытателей. 1992. Т. 82. Вып. 2. (Геофизика в региональной геологии). С. 3-11.
4. Краев А. П., Семенов А. С., Тархов А. Г. Сверхглубокое электроразведывание // Разведка недр. 1947. № 3. С. 40-41.
5. Семенов А. С., Жамалетдинов А. А. Глубинные электрические зондирования // Вестн. Ленингр. ун-та. 1981. № 18. С. 5-11.
6. Тихонов А. Н. Определение электрических свойств глубоких слоев земной коры // Докл. АН СССР. 1950. Т. 73. № 2.
7. Cagniard L. Basic theory of magnetotelluric method of geophysical prospecting // Geophysics. 1953. Vol. 18. N 3.
8. Бердичевский М. Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического зондирования. М., 1968.
9. Keller G. V. Electrical properties in the deep crust // IEEE, Trans. Antennas and Propag. 1963. Vol. 11. № 3. P. 344-357.
10. Cantwell T., Nelson P., Webb J., Orange A. S. Deep resistivity measurements in the Pacific north-west // J. Geoph. Res. 1965. Vol. 70. N 8. P. 1931-1937.
11. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований М., 1965.
12. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-неоднородных сред. М., 1991.
13. Keller G. V., Anderson L. G., Pritchard Y. I. Geological survey investigations of the crust and upper mantle // Geophysics. 1966. № 6. P. 1078-1087.
14. Любимова Е. А., Фельдман И. С. Тепловой поток, температура и электропроводность земной коры и верхней мантии Земли // Кора и верхняя мантия Земли. Вып. 2. М., 1975. С. 144-190.
15. Hyndman R. D., Shearer P. M. Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results // Geophys. J. Inter. 1989. № 98. P. 343-365.
16. Ваньян Л. Л. Электропроводность земной коры в связи с ее флюидным режимом // Коровые аномалии электропроводности. Л., 1984. С. 27-35.
17. Chermak V., Lastovichkova M. Temperature profiles in the Earth of Importance to Deep Electrical conductivity models // Pageoph. 1987. Vol. 125. P. 255-284.

18. Семенов А. С. Природа электрической проводимости древнего кристаллического фундамента // Вестн. Ленингр. ун-та. 1970. № 12. С. 19–26.
19. Семенов А. С. Структура и природа электрической проводимости древнего кристаллического фундамента // Вопросы геофизики. 1971. Вып. 21. С. 2–26.
20. Вагшаль Д. С. Об электропроводности серпентинитов // Докл. АН СССР. 1970. Т. 190. № 3. С. 651–654.
21. Файнберг Ф. С., Семенов А. С. Изменение минерального состава и магнитной восприимчивости железосодержащих пород и руд в зависимости от температуры // Вопросы геофизики. 1960. Вып. 12. С. 99–107.
22. Жамалетдинов А. А., Семенов А. С. Электронно-проводящие породы северо-западной части Кольского полуострова // Там же. 1978. Вып. 27. С. 99–108.
23. Жамалетдинов А. А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л., 1990.
24. Жамалетдинов А. А. Графит в земной коре и аномалии электропроводности // Изв. РАН. Физика Земли. 1996. № 4. С. 12–29.
25. Рокитянский И. И., Шуман В. Н., Логвинов И. М. и др. Частотные зондирования над Кировоградской аномалией проводимости // Геофизический журнал. 1983. Т. У. № 2. С. 88–90.
26. Бабаджанов Т. П., Басов М. Д., Гатина Р. М. и др. Южно-Тянь-Шаньская аномалия электропроводности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 6. С. 79–90.
27. Adam A., Duma G., Horvath J. A new approach to the electrical conductivity anomalies in the Drauzug-Bakony geological unit // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. Vol. 60. P. 155–162.
28. Jones A. G., Craven J. A. The North American Central Plains conductivity anomaly and its correlation with gravity, magnetic, seismic, and heat flow data in Saskatchewan, Canada // Ibid. P. 169–194.
29. Voerner D. E., Kurtz R. D., Craven J. A. Electrical conductivity and Paleo-Proterozoic foredeeps // J. of Geophys. research. 1996. Vol. 101. № B6. P. 13775–13791.
30. Marmo V. On the origin of ores // N. Jb. Miner. 1960. 13d. Sep. 94. P. 77–89.
31. Сидоренко Св. А., Сидоренко А. В. Органическое вещество в осадочно-метаморфических породах докембрия. М., 1975. 115 с.
32. Виноградов А. П. Изотопы кислорода и фотосинтез. М., 1962. 32 с.
33. Турченко С. И. Связь сульфидного оруденения со стадиями регионального метаморфизма на примере Северной Карелии: Автореф. канд. дис. Л., 1970. 22 с.
34. Иванюк Г. И., Горяинов П. М., Егоров Д. Г. Введение в нелинейную геологию. Апатиты, 1996. 182 с.
35. Батиева И. Д., Бельков И. В., Ветрин В. Р. и др. Гранитоидные формации докембрия северо-восточной части Балтийского щита. Л., 1978.
36. Ковтун А. А., Шейнкман А. Л. Аномалии электропроводности в консолидированной земной коре (южное обрамление Балтийского щита) // Строение литосферы Балтийского щита. М., 1993. С. 71–76.
37. Жданов М. С., Френкель М. А. Миграция электромагнитных полей при решении обратных задач геоэлектрики // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 589–594.
38. Zhamaletdinov A. A., Tokarev A. D., Vinogradov Yu. A. e.a. Deep geoelectrical studies in the Finnmark and Pechenga area by means of the "Khibiny" source // Phys. Earth Planet. Inter. 1993. Vol. 81. № 1–4. P. 277–287.
39. Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. Л., 1989.
40. Korja T., Hjelt S.-E. Electromagnetic studies in the fennoscandian Shield — electrical conductivity of Precambrian crust // Phys. Earth Planet. Inter. 1993. Vol. 83. P. 107–138.

41. Клубуков Б. Н. Фоновая и аномальная электропроводность земной коры Карелии // Изв. РАН. Физика Земли. 1996. № 4. С. 72–77.
42. Жамалетдинов А. А., Ковтун А. А. Схема электропроводности северо-восточной части Балтийского щита. Параметры нормального разреза // Строение литосферы Балтийского щита. М., 1993. С. 86–88.
43. Jones A. G. Observations the electrical asthenosphere beneath Scandinavia // Tectonophysics. 1982. № 90. P. 37–55.
44. Ваньян Л. Л., Бердичевский М. Н., Васин Н. Д. и др. О нормальном геоэлектрическом разрезе // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980. № 2. С. 73–76.
45. Краснобаева А. Г., Дьяконов Б. П., Астафьев П. Ф. и др. Строение северо-восточной части Балтийского щита по магнитотеллурическим данным // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 6. С. 65–73.
46. Жамалетдинов А. А., Семенов А. С. Электронно-проводящие породы кристаллического фундамента — объект глубинных электрических зондирований // Коровые аномалии электропроводности. Л., 1984. С. 8–21.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда Д. Сороса, грант RLZ 300.