

## Природа глубинной электропроводности и связь коровых аномалий с месторождениями полезных ископаемых

Е.В. Поспеева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), [PospeevaEV@ipgg.sbras.ru](mailto:PospeevaEV@ipgg.sbras.ru)

---

### Аннотация

Рассмотрены результаты изучения методом магнитотеллурического зондирования внутренней структуры литосферы в связи с тектоникой, магматизмом и размещением полезных ископаемых эндогенного генезиса. Показано, что основными элементами глубинной электропроводности Земли являются коровый и мантийный (астеносфера) проводящие слои. Параметры этих слоев (глубина залегания верхней кромки, мощность и удельное сопротивление) напрямую связаны с геотермическим режимом региона, в котором они выделяются. Обсуждаются основные гипотезы формирования корового проводящего слоя и локализованных геоэлектрических неоднородностей с аномальными значениями удельного сопротивления, выявленные в разрезе консолидированной земной коры на различных глубинных уровнях. Приведен анализ результатов магнитотеллурических исследований, выполненных в пределах известных рудных провинций как у нас в стране, так и за ее пределами. Согласно этому анализу, рудные районы, крупные узлы и поля закономерно сопряжены с литосферными геоэлектрическими неоднородностями различного класса и ранга в определенных сочетаниях для различных полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, литосфера, проводящие слои, геоэлектрические неоднородности, рудные районы.

---

### Введение

Основной задачей наук о Земле является изучение процессов внутреннего развития и формирования отдельных геологических структур, а так же причин тектонической активности. Одним из основных путей понимания этих процессов является изучение внутренней структуры литосферы, отражающей результаты и возможные пути развития этих процессов. Проблемы геологической природы геофизической неоднородности литосферы и вытекающие из этого возможности геофизических методов для изучения глубинных процессов, являются актуальными. Региональные исследования имеют как глубоко теоретическое, так и важное практическое значение. С одной стороны они необходимы для развития фундаментальных представлений о строении и эволюции Земли, а с другой, на их основании можно наметить главные направления поисков и разведки месторождений полезных ископаемых эндогенного генезиса. В общем комплексе региональных геолого-геофизических методов одно из ведущих мест занимает метод магнитотеллурического зондирования, как наиболее глубокий среди электроразведочных методов.

### Природа проводящих слоев в земной коре и верхней мантии Земли

Опыт работ по магнитотеллурическим и магнитовариационным зондированиям, выполненным как у нас в стране, так и за ее

пределами показал, что в земной коре и верхней мантии наблюдается дифференциация электрических свойств и выделяются два слоя повышенной электропроводности. В то время, как ожидалось, что постепенное увеличение температуры с глубиной должно привести к градиентному уменьшению сопротивления. Нижний проводящий слой со значениями удельного сопротивления в первые единицы Ом·м находится в верхней мантии и совпадает со слоем пониженных сейсмических скоростей – астеносферой. Верхний, расположенный в разрезе средней-нижней коры, установлен собственно магнитотеллурическими зондированиями, благодаря его относительно неглубокому залеганию и значительному увеличению электропроводности в его пределах. При объяснении природы проводимости проводящих слоев, как правило, начинают с нижнего, поскольку он отождествляется с астеносферой.

**Мантийный проводящий слой.** Существование пластичной (менее вязкой) оболочки Земли – астеносферы, предсказанной Д. Баррелом в 1914 году, было подтверждено в 50-е годы Б. Гутенбергом. Тогда было обнаружено, что на некоторой глубине уже внутри мантии происходит либо замедление, либо снижение скорости прохождения сейсмических волн вопреки росту давления. Объясняется это еще большим нарастанием температуры до 1200-1300 °С, приводящей к частичному плавлению вещества мантии. Кровля и подошва астеносферы являются геотермическими поверхностями. Их положение в разрезе верхней мантии Земли определяется

пересечением кривой изменения температуры мантии с кривой изменения температуры солидуса мантийного вещества. Согласно А.Е. Рингвуду (Рингвуд, 1981) в пределах астеносферы происходит частичное – от 1 до 5 % плавление базальтовых легкоплавких составляющих. Базальтовые жидкости заполняют межгранулярные пространства между более тугоплавкими кристаллами перидотита, образующими упругий каркас «ослабленного» слоя. Иными словами, в астеносфере образуется двухфазная система кристалл + расплав. Этим объясняется резкое возрастание в ее пределах электропроводности, фиксируемое магнитотеллурическим зондированием.

Длительное время считалось, что под океанами астеносфера располагается на глубинах 50-60 км, а под континентами – 80-100 км. Широкие всесторонние исследования последних десятилетий показывают более сложную картину распространения астеносферы. Обнаружено, что под рифтами срединно-океанических хребтов она местами находится на глубине 2-3 км от поверхности. Примером может служить Восточно-Тихоокеанское поднятие. В пределах кристаллических щитов астеносфера не обнаруживается на глубинах 200-250 км, а на Канадском – до 400 км. Этот факт породил сомнения в непрерывности ее распространения, т.е. в том, что она может рассматриваться как непрерывная оболочка Земли. Существует мнение, что более корректно говорить не об астеносфере, а о наличии отдельных «астенолинз». Вывод о прерывистости астеносферы имел бы большое негативное значение по отношению к гипотезе тектоники плит и вызывает серьезные сомнения. Причина «кажущегося» отсутствия астеносферы заключается в следующем: 1) глубине ее залегания свыше 250 км; 2) увеличением в этих структурах ее вязкости против характерной для океанов и орогенов и как следствие – большей трудности обнаружения существующими методами.

По мнению Е.В. Артюшкова (Артюшков, 1979) вязкость астеносферы может изменяться в пределах  $10^{16}$ - $10^{19}$  Пуаз, т.е. на три порядка. Близость температуры к температуре солидуса обеспечивает веществу относительно пониженную вязкость, поэтому слой пониженной вязкости будет существовать и между астенолинзами. Вязкость, глубина залегания и мощность астеносферы – это, в основном, функция величины теплового потока. При его средней величине, равной  $1.4$ - $1.5$  мккал/см<sup>2</sup>, наблюдаются значительные локальные колебания этих величин. Установлена связь между тектонической активностью, интенсивностью теплового потока и степенью выраженности астеносферы. Наиболее активные эндогенные процессы сопровождаются наиболее интенсивным тепловым потоком, наиболее мощной и наименее глубоко залегающей астеносферой, которая в наибольшей степени влияет на распределение

скоростных и электрических характеристик (Жарков, 1983). Такая активная астеносфера наблюдается сейчас в рифтовых зонах и областях современного вулканизма. Наиболее спокойные режимы, в особенности режимы кристаллических щитов древних платформ, сопровождаются значительно меньшим тепловым потоком и слабо выраженной астеносферой, либо ее отсутствием.

**Коровый проводящий слой.** Впервые проводящий слой в разрезе средней-нижней коры был выделен В.И. Поспеевым в Байкальском регионе в начале 60-ых годов прошлого века. И если природа проводимости мантийного проводящего слоя, не вызвала не каких сомнений, то природа проводимости корового слоя, да и сам факт его существования, обсуждались со дня его обнаружения. В настоящее время существуют две основные гипотезы, объясняющие значительное увеличение электропроводности пород консолидированной коры в пределах слоя:

- электронно-проводящая, основанная на связи проводящего слоя с графитистыми и сульфидно-графитистыми породами (Семенов, 1970; Семенов и др., 1981; Жамалетдинов, 1996);

- флюидная (водно-метаморфическая), основанная на присутствии флюида, генерирующегося непосредственно в земной коре под воздействием процессов метаморфической дегидратации (Поспеев, 1966; Adam, 1987; Hyndman et al, 1989; Ваньян и др., 1996).

Дискуссии по поводу природы проводимости корового слоя велись бы до сих пор, если бы этим вопросом не заинтересовались петрологии и геохимии. Действительно, графитовые пленки на кристаллах пород могут увеличить их электропроводность на порядок. Такие пленки обнаружены в породах, и они вполне могут быть причиной высокой проводимости земной коры – эта природа проводимости выглядит убедительно и используется многими исследователями. При этом возникает вопрос: могут ли насыщенные графитом породы образовывать региональные слои в земной коре? Ответ на этот вопрос зависит от того, возможно ли формирование в коре таких пленок в большом масштабе, и какова их сохранность в течение длительного времени. Анализ лабораторных исследований (Киссин, 2009) показал:

- возможность образования графитовых пленок зависит от глубины и температурного режима региона. На глубинах, где температура больше температуры кристаллизации пород углекислота (СО<sub>2</sub>) исключается из этого процесса. То есть, породы, кристаллизующиеся на малых глубинах, не могут быть насыщены графитом;

- проводимость породы зависит от размеров зерен. Мелкозернистые породы (зерна меньше 1 см) имеют удельное электрическое сопротивление меньше 100 Ом·м, в то время как крупнозернистые (зерна больше 10 см) имеют сопротивление более 1000 Ом·м. В пластичной нижней коре – крупнозернистая

структура среды, поэтому объяснение ее высокой проводимости за счет графита выглядит малообоснованным;

- проводимость графитосодержащих пород резко меняется при изменении РТ-условий, и вряд ли они могут образовывать стабильные зоны с высокой проводимостью в течение длительного времени;
- графит не обладает достаточной подвижностью, чтобы распространяться в процессе диффузии на большие расстояния от первоначального источника. Поэтому для объяснения возможной насыщенности графитом пород всей нижней коры, нужно предположить ее предварительную пропитку флюидами, насыщенными углекислотой (CO<sub>2</sub>) или оксидом углерода (СО).

В пользу водно-метаморфической гипотезы свидетельствуют следующие факты:

- в большинстве случаев наблюдается совпадение положения электропроводящего слоя и сейсмического волновода в разрезе средней-нижней коры. Последний выделяется в виде зоны пониженных сейсмических скоростей и повышенных поглощений сейсмических волн, а также расчлененности коры – наличием серии отражающих площадок. Связь с флюидами коровых сейсмических волноводов подтверждается результатами многолетних экспериментальных работ, выполненных Е.Б. Лебедевым с соавторами (Лебедев и др., 1989; Lebedev, et al, 1999). Поглощение упругих волн связывают с наличием флюида в трещинах и порах и его реакцией при прохождении упругих волн в среде (Кобранова, 1986; Невский, 1994; Копничев и др., 2003);

- локализация волновода и электропроводящего слоя зависит от геотермических условий, а их кровля в структурах различного возраста находится на глубинах, соответствующих изотермам 350-400 °С;

- установлена хорошая корреляция между глубинами кровли проводящего слоя и волновода с интенсивностью теплового потока, которые уменьшаются по мере его роста.

Сейчас уже не подвергается сомнению тесная связь обеих слоев с флюидами. Температурные условия обеспечивают развитие метаморфических процессов и выделение флюидов в соответствующих горизонтах земной коры. В реальных условиях земной коры, состоящей из разных минералов, в процессе прогрессивного метаморфизма происходит более или менее непрерывное высвобождение воды. При этом непрерывность метаморфической дегидратации в отличие от дегидратации чистых фаз обусловлена минеральными реакциями с участием твердых растворов (Файф и др., 1981). По мнению И.Г. Киссина (Киссин, 2009) такая непрерывная дегидратация является одним из факторов, определяющих длительность существования флюидонасыщенных горизонтов, индикаторами которых служат проводящие слои и волноводы. Их формирование и сохранность происходит при

участии процессов самоорганизации, которые создают определенный баланс между уплотнением – разуплотнением пород. Что и является условием длительного сохранения флюидных систем (Киссин, 2009).

Для понимания процессов, формирующих в разрезе консолидированной коры проводящие слои и волноводы, необходимо остановиться на термине «флюид». Насколько это важно, вытекает из цитаты, приведенной в книге «Экспериментальная и техническая петрология» (2000): «Содержание терминов «флюиды», «растворы» и т.д. физико-химически очень неопределенное, хотя для геологов привычное и интуитивно понятное. Как и всегда в таких случаях свободное применение терминов может привести к путанице и, даже существенным ошибкам». Флюид (от лат. «fluidus», т.е. текучий) – термин свободного пользования, обозначающий любые текущие вещества. Согласно А.И. Кудряшову (Кудряшов, 1991) любое природное вещество, поведение которого при деформации может быть описано законами механики жидкости, является флюидом. Поскольку все реальные тела, какими бы твердыми они не казались, под действием тангенциальных напряжений приобретают свойства текучести, особенно при длительных геологических процессах, то в качестве флюида могут выступать не только воздух атмосферы, воды Мирового океана, поверхностные воды суши и т.д., но и пласты глин, солей, гипса, известняка. Поэтому при использовании термина «флюид» необходимо указывать его установленные или предполагаемые свойства и состав. В классической геохимии и петрологии флюид – это прежде всего надкритическая гидротермальная фаза, наиболее важным компонентом которой является вода (H<sub>2</sub>O) и углекислота (CO<sub>2</sub>), при подчиненном количестве сероводорода, соединений хлора, фтора, бора, гидроксидов калия, натрия, кальция. По данным В.С. Соболева состав метаморфизирующего порового флюида характеризуется следующим соотношением молекулярных долей: H<sub>2</sub>O – 84; CO<sub>2</sub> – 10; H<sub>2</sub>S – 2; HF – 2; HCl – 1,5; N<sub>2</sub> – 0,5. Термин «флюид» был введен именно потому, что это вещество промежуточного состояния между газом и жидкостью и он существует только при температуре выше +374 °С (критическая точка воды). Флюиды в средней и нижней коре по своему химическому составу и физическим свойствам (надкритические флюиды) существенно отличаются от воды, циркулирующей в верхних горизонтах земной коры. Процессы миграции флюидов при высоких термодинамических параметрах протекают иначе, чем в зоне умеренных температур и давлений. Эти процессы в значительной мере определяются воздействием минеральных преобразований (прежде всего метаморфических реакций), магматических очагов, тектонических деформаций. В глубинных условиях существенная роль в миграции флюидов

принадлежит межзерновой проницаемости (Зарайский и др., 1983; Киссин, 2009).

Метаморфогенные водные растворы и надкритические флюиды составляют открытую вверх гидрофизическую систему в земной коре и прилегающей части верхней мантии, которую А.В. Покровский подразделяет на четыре гидрофизические зоны (Покровский, 2006).

В настоящее время коровый проводящий слой рассматривается не как геофизическая аномалия, а как элемент внутренней гидросферы Земли (Дерпгольц, 1963; Киссин, 2009; Зверев, 1982, 2011). Он располагается в пределах третьей высокотемпературной гидрофизической зоне, охватывающей породы от зеленосланцевой до амфиболитовой фации включительно. Таким образом, кровля и подошва корового слоя находится на глубинах, соответствующих изотермам 350-400 °С – 750-800 °С. По мере повышения температуры и давления здесь происходят реакции метаморфической дегидратации с высвобождением большей части связанной воды и образованием метаморфогенных растворов и надкритических флюидов, разделенных критической точкой воды (Покровский, 2006; Киссин, 2009). Источниками генерации воды являются также процессы окисления восстановленных мантийных флюидов (Маракушев и др., 1971; Перчук, 2000; Летников, 2000). Скачок электропроводности при процессе метаморфической дегидратации вызван большой подвижностью или диффузией гидроксидов  $\text{OH}^-$  и некоторых катионов из кристаллической решетки минералов (Бондаренко, 1974). Таким образом, как и в астеносфере в коровом проводящем слое образуется двухфазная система «кристалл + раствор».

Суммируя имеющиеся данные, характеризующие сейсмические волноводы и электропроводящие слои, можно сделать вывод, что основная масса приуроченных к ним флюидов генерировалась непосредственно в пределах земной коры под действием процессов метаморфической дегидратации.

#### **Литосферные геоэлектрические неоднородности и их связь с месторождениями полезных ископаемых эндогенного генезиса**

Мантийный и коровый проводящие слои не исчерпывают всего многообразия ситуаций, наблюдаемых в условиях консолидированной коры и верхней мантии. В регионах достаточно плотно изученных магнитотеллурическим зондированием, выявлены геоэлектрические неоднородности, которые размещаются в литосфере на различных глубинных уровнях, имеют различную форму и удельное сопротивление. По проводимости литосферные неоднородности можно разделить на два класса: проводящие и непроводящие, а по площади, заключенной в их контурах на ранги -

региональные ( $30-100 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ ); I ( $5-30 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ ), II ( $0.5-3 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ ), III (единицы и десятки  $\text{км}^2$ ) порядков. Образование неоднородностей связано с процессами перераспределения вещества в эпохи предшествующих фаз активизации. Анализ петрофизических данных показал, что наиболее вероятным источником аномалий высокого сопротивления являются продукты кристаллизации магматических расплавов. В пределах проводящих неоднородностей породы насыщены минералами-проводниками с хорошими электрическими связями, привнос которых осуществлялся по ряду тектонически ослабленных зон и дизъюнктивным нарушениям. Причины, приводящие к существованию в литосфере Земли неоднородностей, фиксируемых геофизическими методами весьма разнообразны. К ним можно отнести различия в вещественном составе и физических свойствах различных структурно-петрофизических комплексов тектоносферы, возникающих в ходе эволюции, а также сформировавшихся в результате последующих термодинамических воздействий. Неоднородности могут быть связаны с изменением физических свойств отдельных участков тектоносферы вследствие воздействия на них или протекания в них процессов сейсмических напряжений, поступлением флюидов и рудных компонентов. Процессы, предшествующие, сопровождающиеся или являющиеся следствием становления и развития эндогенной рудной системы могут фиксироваться электромагнитными зондированиями и проявляться в геоэлектрическом разрезе в виде геоэлектрических неоднородностей. Таким образом, дифференциация земных недр по электропроводности и связь эндогенного оруденения с определенным сочетанием литосферных геоэлектрических неоднородностей составляет основу для осуществления структурного контроля оруденения электромагнитными методами. Эндогенные рудогенерирующие системы построены по единой схеме, включающей три уровня (Виноградов, 1987):

- зону генерации или глубинный источник мобильной фазы (магм или флюидов) с растворенными в ней рудными компонентами;
- транспортную зону или дренажную сеть, выводящую мобильную фазу в верхние горизонты земной коры;
- зону консолидации, где мобильная фаза кристаллизуется (в случае магматических расплавов) или сбрасывает рудную нагрузку и рассеивается (в случае флюидных потоков). Исходя из этого можно предположить, что проводящие зоны могут представлять собой транспортную зону магматических расплавов в верхние горизонты земной коры и связаны с верхним уровнем эндогенной рудообразующей системы. Многочисленные данные о строении рудных районов свидетельствуют об их очаговой природе, причем в большинстве случаев под ними

устанавливаются очаги разуплотнения (в верхней мантии и земной коре), а также пологие зоны волноводов. Все это позволяет рассматривать рудные районы как многоэтажные очаговые постройки, отличающиеся повышенной проницаемостью.

Рассматривая проводящие неоднородности, выявленные во многих регионах как у нас в стране, так и за ее пределами, можно отметить, что они имеют определенную рудную специализацию. Характерным примером являются металлогенические провинции Восточной Сибири. Здесь в контурах Бодайбинской аномалии электропроводности располагаются рудные районы и узлы Саяно-Байкальской металлогенической провинции, проводящие зоны Якутии сопряжены с полями и кустами кимберлитовых трубок, Ангаро-Тунгусская аномалия электропроводности с Ангаро-Илимской железорудной провинцией. Подобная ситуация отмечается практически во всех рудных районах мира. Так, например, в контурах проводящих неоднородностей располагаются известные месторождения и рудопроявления Ларамийского Чилийского медного и Боливийского вольфрамо-оловянного поясов, золоторудные месторождения Украинского щита и Донбасса, группа эндогенных месторождений Аргентины. Таким образом, анализ закономерностей размещения полезных ископаемых в основных рудных провинциях показал, что провинции, районы, крупные узлы и поля месторождений эндогенного генезиса закономерно сопряжены с геоэлектрическими неоднородностями различного класса и ранга в определенных сочетаниях для различных полезных ископаемых. При этом эти соотношения сохраняются в масштабах металлогенических провинций, металлогенических зон, рудных районов и отдельных крупных рудных узлов.

### Литература

- Артюшков ЕВ, 1979 Геодинамика. М: Наука
- Бондаренко АЕ, 1974 Влияние процессов дегидратации на электропроводность горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. Тезисы конференции «Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах». Тбилиси, с 110-112
- Ваньян ЛЛ, Хайндман РД, 1996 О природе электропроводности консолидированной коры. Физика Земли, №4, с 5-11
- Виноградов АН, 1987 Эволюция металлогенической специализации и зональности Кольско-Беломорской системы. В книге: Бельков И.В. (ред.) Эволюция земной коры и эндогенной металлогенической зональности северо-восточной части Балтийского щита. Л: Наука, с 78-94
- Дерпгольц ВФ, 1963 Принципы укрупненной естественной классификации природных вод Земли. Советская геология, № 5, с 7-18
- Жамалетдинов АА, 1996 Графит в земной коре и аномалии электропроводности. Физика Земли, № 4, с 12-29
- Жарков ВН, 1983 Внутренне строение Земли и планет. М: Наука
- Зарайский ГП, Балашов ВН, 1983 Механизм транспорта гидротермальных растворов. Геологический журнал, № 2, с 235-239
- Зверев ВП, 1982 Роль подземных вод в миграции химических элементов. М: Недра
- Зверев ВП, 2011 Подземная гидросфера. Проблемы фундаментальной гидрогеологии. М: Научный мир
- Киссин ИГ, 2009 Флюиды в земной коре геофизические и тектонические аспекты. М: Наука
- Кобранова ВН, 1986 Петрофизика. М: Недра
- Копничев ЮФ, Соколова ИН, 2000 Пространственно-временные вариации поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений. Физика Земли, № 7, с 35-47
- Кудряшов ЛИ, 1991 Флюидогеодинамика. Свердловск: УрО АН СССР
- Лебедев ЕБ, Кадик АА, Зебрин СР, Дорфман АМ, 1989 Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн глубинных пород. Доклады АСССР, т 309, № 5, с 1090-1093
- Летников ФА, 2000 Глубинные флюиды Земли. В книге: Бялко А.В. (ред.) Грани творчества на грани веков. М: Научный мир, с 333-340
- Маракушев АА, Перчук ЛП, 1971 Происхождение и эволюция трансмагматических и метаморфических флюидов. Тезисы международного геохимического конгресса «Международная ассоциация геохимии и космохимии». Москва: АН СССР, с 513-514
- Невский МВ, Фомин ОС, Ризниченко ОЮ, 1994 Затухание Р-волн в земной коре и деформационный процесс. В книге: Николаев А.В. (ред.) Динамические процессы в геофизической среде. М: Наука, с 185-209

Перчук ЛП, 2000 Флюиды в земной коре и верхней мантии Земли. Вестник Московского университета, серия 4 Геология, № 4, с 25-39

Покровский АВ, 2006 Об эндогенной составляющей круговорота воды на Земле. Вестник Балтийского федерального университета, № 7, с 46-56

Поспеев ВИ, 1966 Методы и результаты региональных электроразведочных работ в Иркутском амфитеатре. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Иркутск: Институт Земной коры

Рингвуд АЕ, 1981 Состав и петрология мантии Земли. М: Мир

Семенов АС, 1970 Природа электрической проводимости кристаллического фундамента. Вестник ЛГУ, № 12, с 19-26

Семенов АС, Жамалетдинов АА, 1981 Глубинные электрические зондирования. Вестник ЛГУ, Серия Геология и География, в 3, № 18, с 5-11.

Файф У, Прайс Н, Томпсон А, 1981 Флюиды в земной коре. М: Мир

Adam A, 1987 Are the two types of conductivity anomaly (CA) caused by fluid in the crust? Phys. Earth and Planet, Inter, pp 209-215

Hyndman RD, Shearer PM, 1989 Water in the low continental crust: Modeling magnetotelluric and seismic reflection results. Geophysics J. Inter, v 98, pp 343-365

Lebedev EB, Kern H, 1999 The effect of hydration and dehydration reactions on wave velocities in basalts. Tectonophysics, v 308, pp 331-340