

Крупнейшие аномалии электропроводности мира

© А. А. Жамалетдинов^{1,2}, С. Н. Кулик³, 2012

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

²Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

³Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 7 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии Т. К. Бурахович

На основі виданих і нових експериментальних даних проаналізовано геоелектричні параметри, будову та геолого-тектонічну позицію найінтенсивніших аномалій електропровідності, виявлених на різних континентах планети Земля. Розглянуто критерії поділу аномалій на флюїдні та електронно-провідні, а також їх зв'язок з корисними копалинами.

On the background of published and new experimental data the geoelectric parameters, the structure and geologic-tectonic position of a number of the largest anomalies of electrical conductivity found on different continents of the planet Earth are analysed. Criteria of division of anomalies into fluid and electronically conducting ones are analysed and their relation with mineral deposits is considered.

Введение. Важным результатом электромагнитных зондирований, полученным на разных континентах, является обнаружение протяженных зон и поясов повышенной и высокой электропроводности в земной коре и верхней мантии. Они проявляются в виде так называемых промежуточных проводящих слоев. Это свойство земной коры имеет планетарный масштаб распространения. Глубины залегания аномально проводящих объектов, определяемые по данным формальной (одномерной) интерпретации, изменяются от единиц до многих десятков километров. Их экранирующее влияние существенно ограничивает возможности изучения электропроводности более глубоких горизонтов Земли. В то же время сами аномалии электропроводности представляют интерес как объект специального исследования при решении задач фундаментальной и прикладной геологии. Они указывают на особые условия физического состояния и геодинамического развития соответствующих блоков литосферы. Коренная проблема интерпретации глубинных зондирований — решение вопроса о природе коровых аномалий электропроводности, поскольку этим, прежде всего, определяется их роль в изучении геологического строения и состава глубинных областей Земли.

В настоящее время по вопросу о природе глубинных проводников в литосфере рассматриваются две основные концепции —

электронно-проводящая и флюидная. Авторы данной работы всегда придерживались разных взглядов. Первый автор развивал и развивает электронно-проводящую концепцию, второй автор — флюидную концепцию с геодинамическими приложениями. Это не мешало нам поддерживать многолетнюю дружбу, основанную не только на человеческих симпатиях, но и на общих научных интересах. Много лет мы с Сереей Куликом (извините за приватный стиль) собирались написать совместную статью об аномалиях электропроводности, но постоянные текущие дела мешали объединить усилия. Сейчас, когда Сергея не стало, я пытаюсь восполнить этот пробел и показать сходство и различие наших взглядов. Необходимо заметить, что большая часть крупных аномалий электропроводности находится на глубинах, недоступных для проверки бурением. Поэтому вопрос о природе таких аномалий решается на уровне гипотетических воззрений, опирающихся на те или иные косвенные признаки и на интуицию исследователя. В качестве основных косвенных признаков привлекаются данные комплексной геофизики (сейсмогравимагниторазведки), геолого-тектонические схемы и связь аномалий с теми или иными предполагаемыми геодинамическими процессами.

Настоящая статья состоит из трех разделов. В первом разделе выполнен общий обзор крупнейших аномалий электропроводности

мира по отдельным континентам, во втором — более детальное рассмотрение особенностей проявления аномалий электропроводности в разных геолого-тектонических условиях на примере структур России, Украины и прилегающих территорий. Третий раздел посвящен дискуссии о природе проводящих образований в литосфере.

1. Краткий обзор крупнейших аномалий электропроводности мира по отдельным континентам

Протяженные, вытянутые на тысячи километров региональные и межрегиональные аномалии высокой электропроводности обнаружены на всех континентах Земли. Они могут быть результатом ранних или новейших тектонических процессов, границами континентальных блоков, ареалами проявления древнейшей жизни на Земле или многих других видов проявления геологической деятельности [Жамалетдинов, Семенов, 1984; Kulik, 2004]. Вот примеры некоторых наиболее значительных геоэлектрических структур.

Американский континент. Наиболее яркое проявление геоэлектрической неоднородности Земли — Северо-Американская аномалия высокой электропроводности, расположенная

в районе Великих (Центральных) равнин [Camfield, Gough, 1977; Jones et al., 1990]. Эта геоэлектрическая аномалия установлена по измерениям геомагнитных вариаций в диапазоне бухтообразных колебаний. Она протягивается с востока на запад от бухты Хадсона в Канаде [Gupta et al., 1985], далее изгибается на юг и выходит на территорию Соединенных Штатов. Аномалия прослежена по длине более чем на 2000 км (1 на рис. 1). Ее природа окончательно не установлена. В работе [Gupta et al., 1985] считается, что природа аномалии может быть связана с минерализованными водными растворами, проникающими по зонам разломов либо с процессами десерпентинизации мафических горных пород океанической коры. Одна из гипотез гласит, что это могут быть графитистые сланцы [Stanley, 1989]. В работе А. Джонса [Jones, Savage, 1986] аномалия названа «величайшей и самой загадочной структурой континентального масштаба, обнаруженной в результате электромагнитных индукционных исследований». Она протягивается от юго-восточной части штата Вайоминг по северной границе Канадского щита вдоль регионального геологического разлома, где изучена в районе оз. Невольничье [Schmucker,

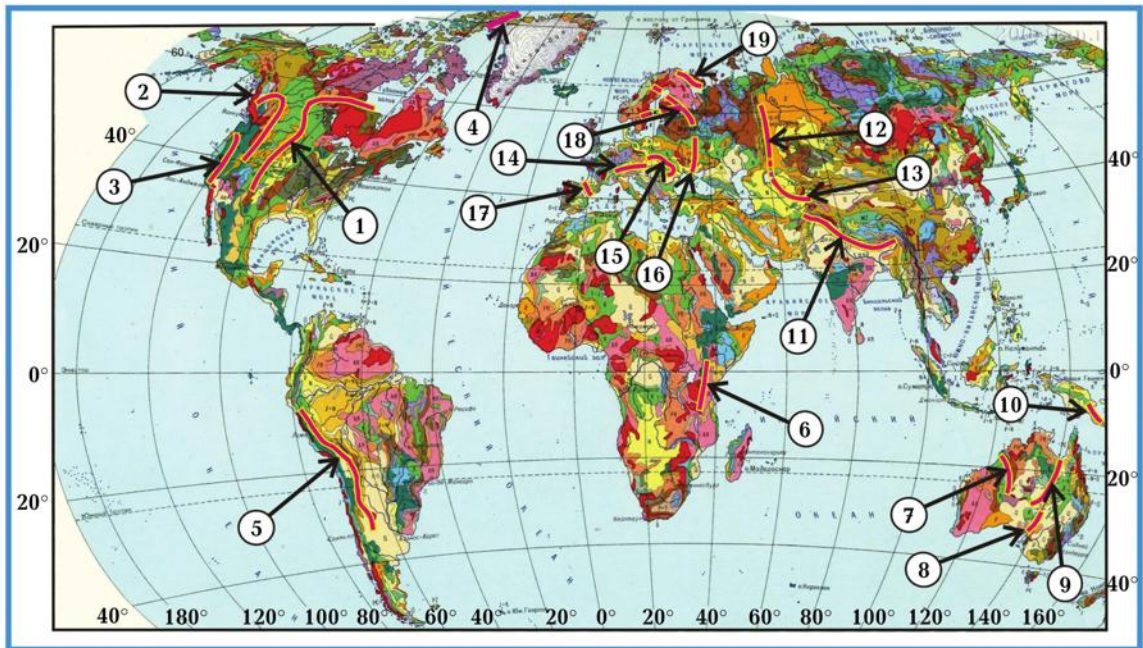


Рис. 1. Крупнейшие аномалии электропроводности мира: 1 — Северо-Американская; 2 — Биттеррут-Каскадные горы; 3 — Сьерра-Невада; 4 — Северо-Гренландская; 5 — Андская; 6 — Кенийская; 7 — Флиндерса; 8 — Юго-Западного Квинсленда; 9 — Карпентария; 10 — Новая Гвинея; 11 — Трансгималайская; 12 — Уральская; 13 — Южно-Тянь-Шаньская; 14 — Альпийско-Паннонская; 15 — Карпатская; 16 — Кировоградская; 17 — Пиренейская; 18 — Ладожско-Ботническая; 19 — Полмак-Печенга-Имандра-Варзуга.

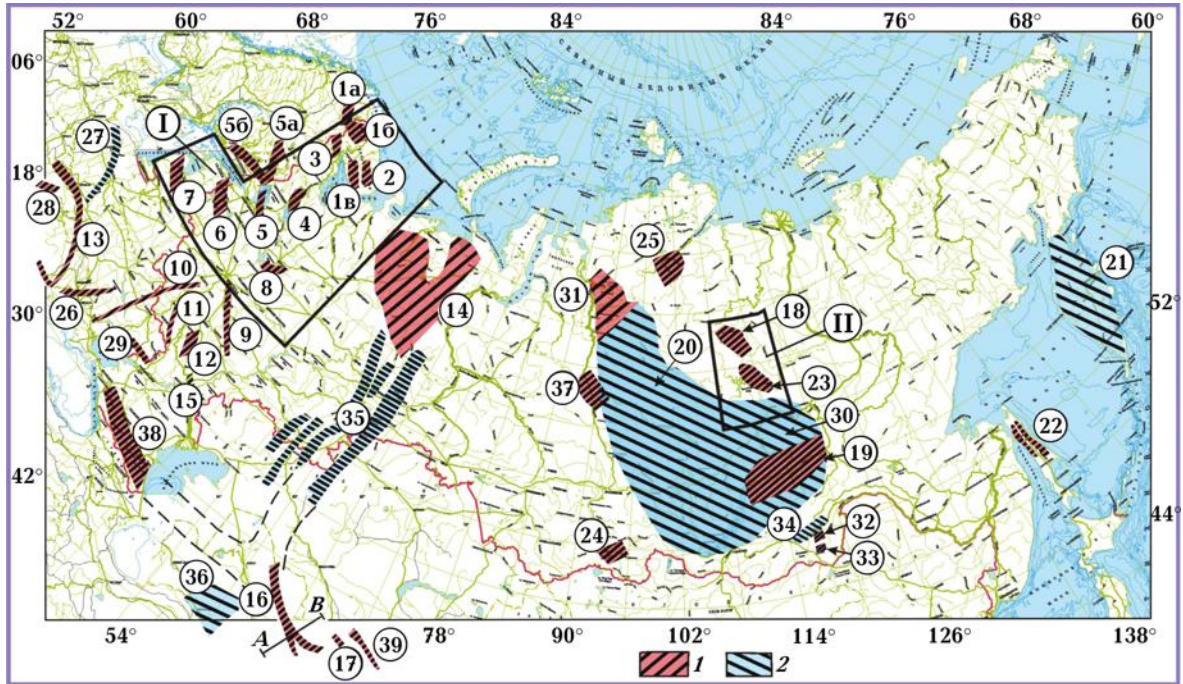


Рис. 2. Схема расположения аномалий электропроводности в земной коре на территории России, Украины и в прилегающих районах. Римскими цифрами в кружках I, II и профилем А—В обозначены участки детального рассмотрения в тексте: 1 — аномалии электронно-проводящей природы; 2 — аномалии флюидной природы; коровые аномалии (цифры в кружках): 1 — Лапландско-Печенегско-Варзугская рифтогенная система проводящих зон (1а — Лапландская, 1б — Печенгская; 1в — Имандра-Варзугская); 2 — Кейвская; 3 — Тикшеозерская; 4 — Онежская; 5 — Ладожская; 5а — Ботническая; 5б — Южно-Финляндская; 6 — Чудская; 7 — Прибалтийская; 8 — Вологодская; 9 — Тамбовская; 10 — Кировоградская; 11 — Курская; 12 — Воронежская; 13 — Карпатская; 14 — Тимано-Печорская; 15 — Фроловская; 16 — Тянь-Шаньская; 17 — Ферганская; 18 — Анабарская; 19 — Бодайбинская (Байкальская рифтовая зона); 20 — Восточно-Сибирская; 21 — Камчатская; 22 — Сахалинская; 23 — Вилюйская; 24 — Минусинская; 25 — Хатангская; 26 — Измаил-Полтавская; 27 — Северо-Германская; 28 — Паннонская; 29 — Донбасская; 30 — Восточно-Сибирская; 31 — Норильская; 32 — Ундино-Балейская; 33 — Курунзулайская; 34 — Монголо-Охотская; 35 — Уральская; 36 — Копет-Датская; 37 — Тунгусская; 38 — Северо-Кавказская; 39 — Таласо-Ферганская.

1970; Camfield, Gough, 1977]. Есть предположение, что аномалия уходит далее на восток, в бассейн Гудзонова залива. Она лежит внутри области, которая выделяется в работе [Handa, Camfield, 1984] как протерозойский массив. П. Кемфилдем и Д. Гафом [1977] высказано предположение, что аномалия электропроводности в земной коре Великих равнин маркирует границу протерозойской плиты.

В конце 1960-х годов в западной части США было установлено аномальное поведение горизонтальной (широтной) и вертикальной компонент переменного геомагнитного поля на периодах 32,5, 50, 60 и 89 мин по результатам магнитовариационных исследований [Porath et al., 1970; Porath, 1971]. Несколько позднее в восточной и центральной частях Великого бассейна и в районе плато Колорадо были измерены три профиля магнитотеллурических зондирований. По этим данным, к западу от описанной выше аномалии Великих равнин, установлена интенсивная аномалия

электропроводности (2 на рис. 1), прослеживаемая вдоль хребтов Биттеррут и Уосатч и далее к Каскадным горам [Рокитянский, 1975].

На основе данных У. Шмукера [Schmucker, 1970] выявлена аномалия электропроводности на побережье Тихого океана в долинах рек Сакраменто и Сан-Хоакин, в межгорье между Береговым хребтом и Сьерра-Невада, а также под хребтом Сьерра-Невада. Далее на юг аномалия выходит к Калифорнийскому заливу (3 на рис. 1).

В работе [Гиллули, 1975] исследовано положение мезозойских надвигов на западе Невады. Граница палеоген-неогеновых тектонических движений совпадает с положением Северо-Американской аномалии Великих равнин, а Каскадная аномалия в западной части США, проходящая на востоке вдоль хребтов Биттеррут и Уосатч, совпадает с «внутриконтинентальным поясом юрско-меловых надвигов». Д. Гиллули [1975] указывает на то, что надвиги и тектоническая активность свя-

заны с движениями меридионального простиранья. Непосредственные проявления широтных сжатий здесь отсутствуют. Масштаб распространения тектонических движений на восток от западного побережья Северной Америки превысил 1500 км вплоть до южной границы Скалистых гор.

В Южной Америке, в Андах, по данным [Brasse et al., 2001, 2002; Soyer, Brasse, 2001], установлена аномалия электропроводности, вытянутая вдоль береговой линии Тихого океана более чем на 2500 км (5 на рис. 1). Г. Брассе и П. Лазаета с коллегами [2001, 2002] провели длиннопериодные глубинные геомагнитные зондирования в Центральных Андах, включая высокогорное плато Альтиплано. Аномалия обнаружена на глубине около 10 км. Предполагается, что высокая электропроводность вызвана флюидами, образовавшимися в результате метаморфизма в Андах, и частичным плавлением вещества в Альтиплано. Система разломов, контролирующая Андскую аномалию электропроводности, соответствует зоне субдукции океанической плиты Наска под Южно-Американскую континентальную плиту.

Африка. В Центральной Африке магнитотеллурическими и магнитовариационными работами [Sakkas et al., 2002] обнаружена область повышенной электропроводности в земной коре в районе Кенийского рифта (6 на рис. 1). Верхняя кромка проводника залегает на глубине 25 км. Заметим, что в середине 1970-х годов на южном продолжении этой аномалии проводились эксперименты по глубинному и сверхглубинному электромагнитному зондированию литосферы с использованием промышленной линии электропередачи постоянного тока «Кабора—Басса» протяженностью 1250 км [Blohm et al., 1977]. По результатам этих исследований установлен проводящий объект на глубинах 10—20 км. Возможно, что природа проводника также связана с влиянием предполагаемого продолжения на юг Кенийской аномалии электропроводности.

Австралия. Наиболее протяженной аномалией электропроводности в Австралии является глубинная область низкого сопротивления, установленная в районе залива Карпентария. Аномалия продолжается вглубь континента в субмеридиональном направлении на расстояние более 1000 км (9 на рис. 1). Эта аномалия была обнаружена в 1997 г. в результате площадных магнитовариационных исследований

и по данным магнитотеллурических зондирований [Lilley et al., 2001]. По результатам этих исследований выделен проводник в земной коре на глубине около 10 км под осадками бассейна Эроманга.

Аномалия проводимости Карпентария фиксируется также по гравитационным и аэромагнитным данным. Она рассматривается как внутриплитный шов, являющийся восточной границей блока Маунт-Айза. По сейсмическим данным эта зона выделяется как уходящая в мантию область резкого изменения скоростей распространения сейсмических волн. В работе [Lilley et al., 2001] изложена гипотеза о том, что аномалии электропроводности Австралии — Карпентария (9), Юго-Западного Квинсленда (8) и Флиндерса (7) соответствуют континентальным швам и представляют собой фундаментальные маркеры, указывающие на особенности взаимоотношения литосферных блоков. Блок Маунт-Айза — главный докембрийский, протерозойский элемент Австралийской платформы. Этот блок известен месторождениями цинка, свинца, золота и меди. Существует различие в возрасте между платформенными областями Западной и Центральной Австралии и восточной ее частью. В работе Б. Кеннета [2002] показано, что, согласно данным сейсмической томографии, по 3D интерпретации поверхностных волн обнаруживается существенное различие между кратоном и восточными регионами континента, разделенными между собой аномалией электропроводности Карпентария. Возможно, что некоторые из этих изменений могли быть следствием температурных влияний неогенового вулканизма в восточной области Австралии, а высокие сейсмические скорости на щите связаны с изменчивостью химического состава литосферы. Считается, что Тихоокеанская литосферная плита внедряется с юго-востока под Австралийскую плиту, образуя в нижней коре и верхней мантии адвекцию холодного материала. Это, в свою очередь, приводит к тому, что в результате метаморфизма и радиоактивного разогрева появляются свободные флюиды, увеличивающие электропроводность вышележащих геологических структур.

Евразийский континент. Две большие области северо-западной части Индии исследованы площадными магнитовариационными наблюдениями в 1979—1980 гг. [Agora, 1990]. На этих же территориях были выполнены профильные магнитотеллурические наблю-

дения. Результаты исследований позволили обнаружить вытянутую область высокой электропроводности, которая получила название Трансгималайской аномалии (11 на рис. 1). В земной коре Азиатского континента эта аномалия является одной из наиболее мощных и протяженных структур. На большей части своего пространства она залегает на глубинах 10—20 км и только на территории Кангмарского купола выходит близко к земной поверхности. По данным электромагнитного профиля, пересекающего на севере рифт Ядонг-Гулу, область высокой электропроводности расширяется за пределами рифта [Chen et al., 1996].

Комплексные сейсмические и электромагнитные исследования в Тибете показали, что можно предположить существование зоны частичного плавления в нижней части коры в Тибете. Эти данные привели авторов [Chen et al., 1996] к новой концепции о вытеснении средней части земной коры из-под Индийского щита на Евразийскую плиту. Примерно такой же вывод сделан в работе [Гиллули, 1975], где утверждается, что Главный Гималайский хребет сложен породами, аналогичными гнейсам Индийский щита.

На Тайване методом МТЗ обнаружена аномалия электропроводности протяженностью 100 км, простирающаяся с северо-запада на юго-восток [Chen, Chen, 2000]. Ширина аномалии достигает 20 км. В районе Саныи-Пули к ней приурочена зона повышенной сейсмической активности региона.

Через южную часть Шотландии от берега к берегу проходит аномалия в геомагнитных вариациях, соответствующая области высокой электропроводности на глубине 4—12 км. Пространственно она совпадает с отрицательной гравитационной аномалией Буге [Рокитянский, 1975].

Граница между палеозойскими герцинидами Центральной Европы и палеоген-неогеновыми Карпатами характеризуется значительным контрастом в электропроводности земной коры. Северо-восточный контакт герцинид и архейской системы Восточно-Европейской платформы, известной как трансевропейская шовная зона Тейсейре—Торнквиста (TESZ), отмечается Северо-Германско-Польской аномалией в бухтообразных геомагнитных вариациях. Эта региональная структура в геоэлектрическом отношении характеризуется слоем высокой электропроводности в средней мантии, где

в довольно широкой (примерно от 15° до 40° в. д.) и протяженной области проводимость увеличивается до 100 тыс. См [Semenov et al., 2003].

Остальные аномалии электропроводности Евразийского континента (рис. 1, 12—19) рассмотрены ниже.

2. Аномалии электропроводности в литосфере России, Украины и смежных территорий Европы и Азии.

Схема распространения аномалий электропроводности России, Украины и смежных территорий Европы и Азии показана на рис. 2. Схема составлена на основе обобщения экспериментальных данных М. Н. Бердичевского, Л. Л. Ваньяна, В. Г. Дубровского, А. А. Жамалетдинова, А. А. Ковтун, А. Г. Краснобаевой, С. Н. Кулика, Ю. Ф. Мороза, В. М. Никифорова, Е. С. Подловилина, О. Л. Полторацкой, И. И. Рокитянского, Э. Б. Файнберга. На ней аномальные объекты разделены по природе их происхождения на электронно-проводящие и флюидные. В основу такого разделения положены количественные и качественные критерии, рассмотренные в разделе 3, а также выводы исследователей, обнаруживших и описавших те или иные участки земной коры.

Согласно рис. 2, области распространения коровых аномалий флюидной природы занимают, главным образом, восточную часть территории стран СНГ. Аномалии характеризуются умеренными значениями сопротивления (первые сотни омметра); обладают изометричной или слабовытянутой формой с нечеткими контурами. Среди наиболее известных и признанных коровых аномалий флюидного типа следует выделить Копет-Дагскую (36), Восточно-Сибирскую (20, 30), Камчатскую (21). Часть аномалий (5—9), по мнению изучавших их исследователей [Ковтун, 1989], относится к типу двухъярусных, обусловленных совместным влиянием флюидных и электронно-проводящих факторов. Здесь и далее цифрами в скобках обозначены номера аномалий электропроводности, показанных на рис. 2.

Урало-Тянь-Шаньская аномалия электропроводности. Протяженные полосовидные аномалии электропроводности предполагаемой флюидной природы выделены вдоль Урала (35 на рис. 2). Далее на юг они соединяются пунктирными линиями через район Аральского моря (где наблюдения отсутствуют) с Тянь-Шаньской (она же Мурунтауская) аномалией (16). Долгое время

природу этой аномалии трактовали как флюидную, и только после того, как Мурунтауская сверхглубокая скважина подсекла на глубине 7 км пласт графита, дискуссия прекратилась в пользу электронно-проводящей природы [Бабаджанов и др., 1986]. В. Шапиро [1988] объясняет всю описанную систему аномалий проводимости, протягивающуюся в виде дугообразной полосы общей протяженностью порядка 3,5 тыс. км (16 и 35 на рис. 2), как единый краевой пояс, образовавшийся в результате коллизионных явлений на границе девонского континента, надвигавшегося на Уральский и Южно-Тянь-Шаньский палеоокеан.

С этой точкой зрения согласуется оригинальная трактовка истории геологического развития метаморфических формаций Тянь-Шаня, предложенная А. Б. Бакировым [1984]. Он обратил внимание на наблюдаемое вдоль Тянь-Шаньской дуги необычное переслаивание (перемешивание) двух типов геологических образований, резко различающихся между собой по генезису. Они включают в себя породы офиолитовой ассоциации (ультрабазиты, базиты, эклогиты), образованные при метаморфизме океанической коры, и породы первично-осадочного происхождения (графитосодержащие сланцы, гнейсы, кварциты),

образованные при метаморфизме континентальной коры. Геодинамическая модель, объясняющая генезис указанных формаций, показана на рис. 3.

На рис. 3, I, согласно А. Б. Бакирову [1984], предполагается, что океаническая кора (2) в процессе субдукции увлекла (затянула) за собой на глубину до 60—130 км осадочные толщи (4), отложенные на пассивном крае континента. На заключительных этапах развития (рис. 3, в, г) происходит «перемешивание» метаморфизованных (графитосодержащих) осадков (5) с эклогитами (3), образованными на глубине путем перекристаллизации океанической коры. Из этой смеси возникла своеобразная «кашеобразная масса», по определению А. Б. Бакирова, которая затем была выжата к земной поверхности вдоль шва столкнувшихся континентов (рис. 3, г).

Представленная гипотеза, основанная на большом объеме минералогических и петрологических исследований, позволяет удовлетворительно объяснить факт сосуществования переслаивающихся первично-магматических и первично-осадочных пород, подвергнутых высокотемпературному, высокобарическому метаморфизму. В составе этих формаций широко распространены графит-

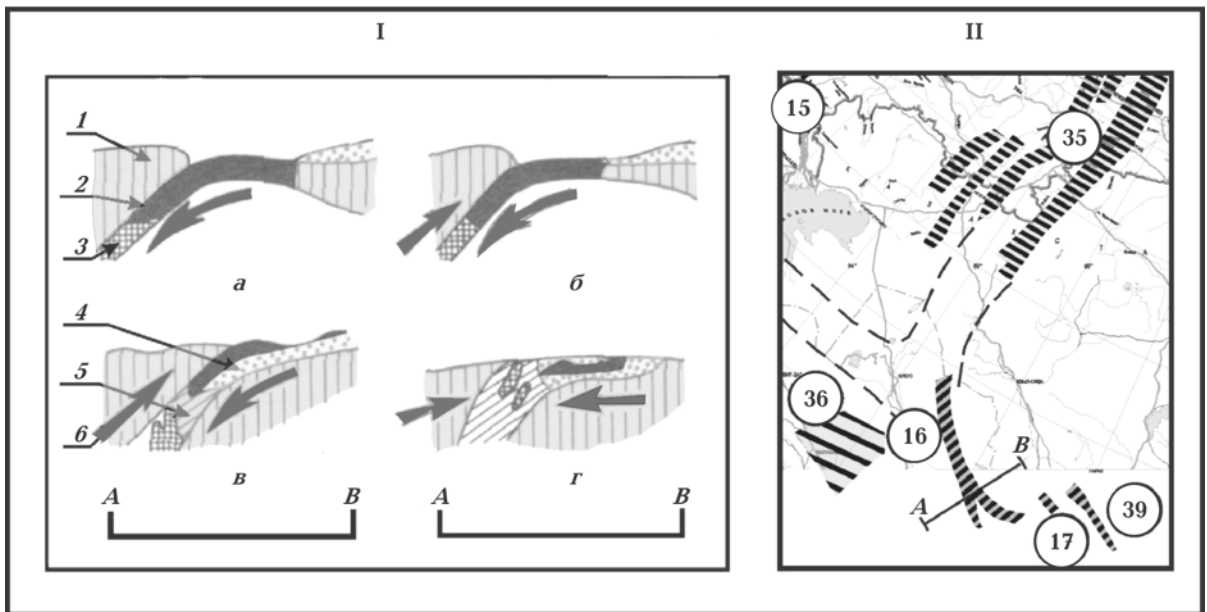


Рис. 3. Модель образования электронно-проводящих графитосодержащих сланцев Южно-Тянь-Шаньской (Мурунтауской) аномалии проводимости (положение профиля А—В и карты-врезки II показано на рис. 2): 1 — континентальная кора; 2 — океаническая кора; 3 — эклогиты; 4 — осадки пассивного края континента; 5 — метаморфизованные осадки, содержащие графит органической природы; 6 — направление движущих сил на разных стадиях развития коллизионной зоны: а, б — субдукция, поддвигание океанической коры под континент; в, г — апдукция, выжимание метаморфизованного материала океанической коры и древних осадков вверх на границе сталкивающихся плит.

тистые сланцы, содержащие углерод органического происхождения. С ними связывается природа Тянь-Шаньской аномалии электропроводности, прослеженной более чем на 1000 км по простиранию (13 на рис. 1 и 16 на рис. 2). Ее продольная проводимость, по оценкам разных авторов, составляет от 10—15 тыс. до 300 тыс. См.

Альпийская система проводящих зон. Карпатская аномалия электропроводности. Штриховой линией на рис. 2 показано ответвление Тянь-Шаньской аномалии электропроводности на запад, в сторону Каспийского моря и далее на Кавказ. Анализ опубликованной литературы [Adam, 2005] привел к выводу, что коровые аномалии электропроводности, связываемые с графитом, наблюдаются вдоль всей Альпийской системы складчатости. Углеродистые образования «черного» мела прослежены И. С. Фельдманом на Северном Кавказе в виде проводящего слоя, полого погружающегося на глубину 10—20 км [Фельдман, 2005]. А. Адам [2005] предлагает связывать с черными графитистыми сланцами природу коровых аномалий электропроводности Альпийской коллизионной зоны (глубина 12—17 км) и ее продолжение на восток, в район оз. Балатон (зона 14 на рис. 1, глубины 5—9 км). С графитом, по сообщению И. И. Рокитянского [1975], связана также природа мощной аномалии электропроводности в Пиренеях (17 на рис. 1).

Один из наиболее крупных проводящих объектов в цепи Альпийской системы складчатости (после Тянь-Шаньской зоны) — Карпатская аномалия электропроводности, вытянутая вдоль внутренней дуги Складчатых Карпат более чем на 1000 км (15 на рис. 1; 13 на рис. 2). Впервые обнаруженная в прошлом веке [Wiese, 1963; Adam, 1969], она в течение почти полувека является объектом исследований и активных дискуссий по вопросу о ее строении и природе. С теми или иными отклонениями природа аномалии трактуется большинством авторов как связанная с флюидными и температурными изменениями на границе субдуцирующих литосферных плит. Глубина залегания аномалии изменяется от 10 до 20—25 км по данным разных авторов. Однако флюидная концепция, в приложении к истолкованию природы Карпатской аномалии, сталкивается с труднопреодолимыми противоречиями. Прежде всего, они связаны с необходимостью предположить существование температур в 500—600 °С на срав-

нительно небольших глубинах — от 5—7 до 10—15 км. К этому следует добавить, что положение оси аномалии в плане не согласуется с характером изолиний плотности теплового потока [Cermak, Pibakh, 1977].

Более логичное истолкование природы Карпатской аномалии предложено с позиции электронно-проводящей концепции А. С. Семенова [1970]. По геологическим данным [Матковский, Кульчецкая, 1990], графит и графитоподобные минералы широко распространены в виде довольно узкой полосы метаморфизованных пород Мармарошской зоны кристаллических сланцев, пространственно совпадающей с положением оси глубинной аномалии электропроводности от г. Рахов до г. Ужгород. А. И. Ивлиевым в районе г. Рахов были отобраны образцы графитистых пород на лабораторные испытания. Результаты испытаний показали высокую электронную проводимость пород [Жамалетдинов, 1996]. Далее на запад аналогичные геологические образования, представленные кристаллосланцами Пенинской утесовой зоны, развиты вдоль всей оси Карпатской аномалии, прослеженной почти на 1000 км. В работе [Zhamaletdinov, 2005] подробно рассмотрены особенности проявления Карпатской аномалии по геофизическим данным, выполнено численное моделирование и обосновано истолкование ее природы с позиции электронно-проводящей концепции. Там же проведена параллель с Южно-Тянь-Шаньской аномалией в отношении геодинамической трактовки ее природы. На рис. 4 по данным [Stanley, 1989] показан пример двумерной интерпретации Карпатской аномалии (15 на рис. 1) в сопоставлении с аномалией электропроводности Каскадной зоны в Северной Америке (2 на рис. 1). В работе обосновывается графитовая природа обеих аномалий электропроводности.

Палеозойский фундамент. Мощные коровые проводники установлены в палеозойском фундаменте Сибири. Они прослеживаются в виде полосы с севера на юг (рис. 2) — Хатангская (25), Анабарская (18), Вилюйская (23) и Байкальская аномалии (19). Последняя объединяет в себе систему проводящих объектов Байкальской рифтовой зоны, в том числе Бодайбинскую аномалию, продольная проводимость которой достигает 10—15 тыс. См. В большинстве работ их природа трактуется как флюидная [Бердичевский и др., 1969; Ваньян, 1984; Полторацкая и др., 1984]. Наряду с этим имеются многочисленные прямые и

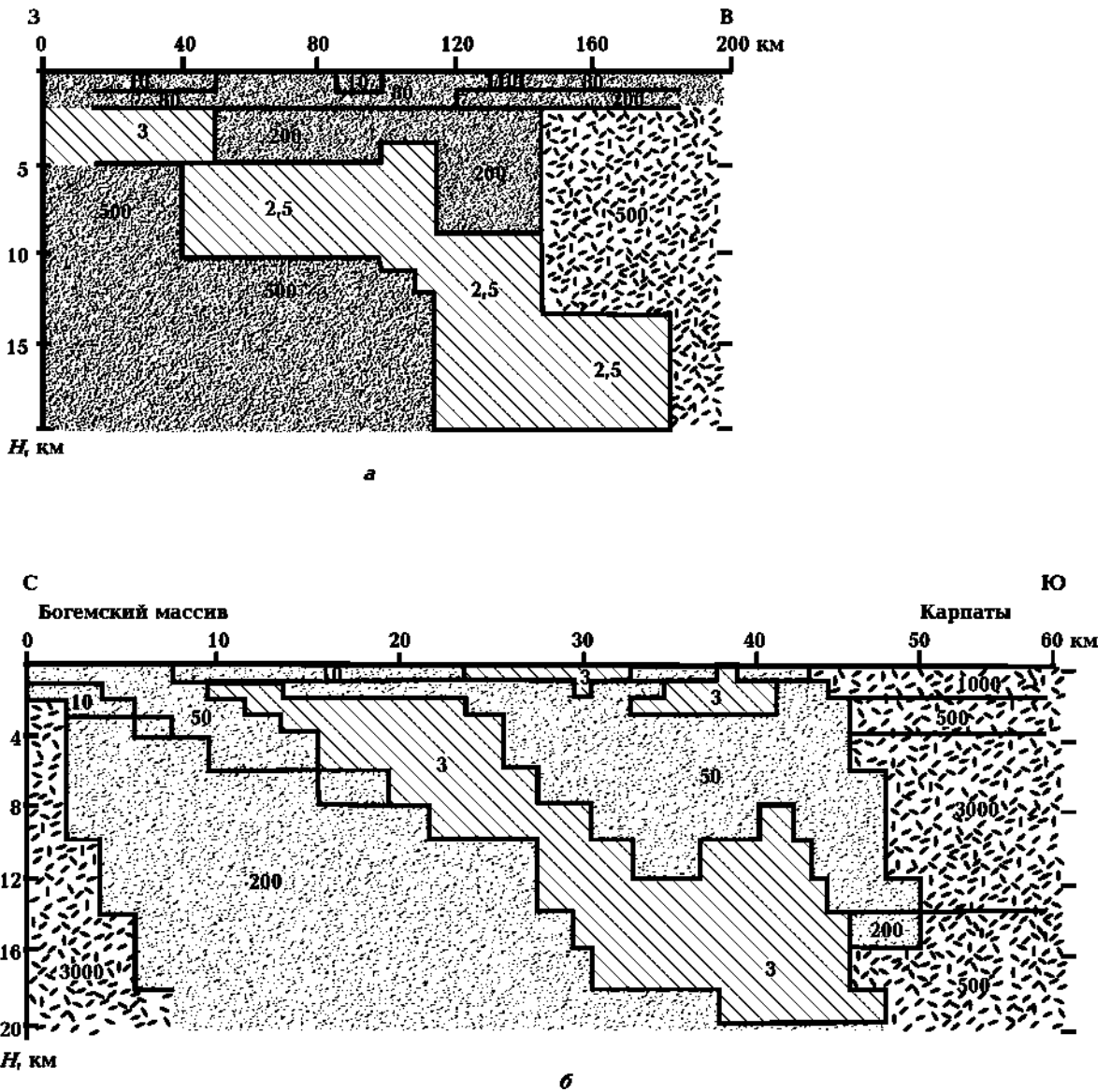


Рис. 4. Пример двумерной интерпретации аномалий электропроводности и истолкования их природы за счет существования графитосодержащих осадочных толщ на контактах сталкивающихся (субдуцирующих) плит [Stanley, 1989]: а — Каскадная зона; б — Карпатский прогиб.

косвенные указания на связь этих аномалий с углистыми и графитистыми сланцами, сопровождаемыми сульфидной минерализацией [Фельдман, 2005].

Анабарская (18) и Вилюйская (23) аномалии практически смыкаются между собой и охватывают площадь порядка 250 тыс. км². Они резко неоднородны по строению и, в свою очередь, распадаются на несколько десятков более мелких проводящих объектов в большинстве изометричной или слабовытянутой формы. Более детальная схема их расположе-

ния показана на вставке, в правом верхнем углу рис. 5, где приведены типовые кривые магнитотеллурического зондирования над безаномальными (рис. 5, а) и аномальными (рис. 5, б) участками Анабарско-Вилюйского района.

Глубины залегания аномально проводящих объектов в земной коре изменяются от 1,5—2 км на южном склоне Анабарского щита до 8—10 км в районе Вилюйской синеклизы [Бердичевский и др., 1969; Полторацкая и др., 1984]. Продольная проводимость ло-

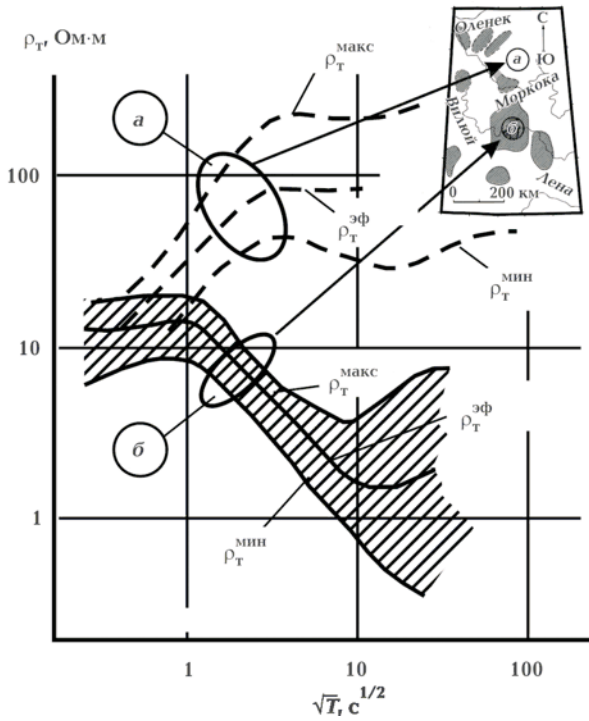


Рис. 5. Пример типовых кривых магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в Анабарско-Вилуйском районе [Полторацкая и др., 1984]: а — кривые $\rho_T^{эф}$, $\rho_T^{мин}$, $\rho_T^{макс}$ для «нормального» (безаномального) геоэлектрического разреза; б — то же над аномалиями электропроводности.

кальных проводящих тел варьирует от 5 тыс. до 80 тыс. См. С большинством из них пространственно совпадают интенсивные проявления кимберлитового магматизма среднепалеозойского возраста. Считается, что источники кимберлитовой магмы могли располагаться на глубинах 3—15 км. Тепловые потоки, связанные с существованием магматических очагов на небольших глубинах, могли способствовать преобразованию органического вещества осадочных бассейнов в графит и алмазы. Последнее утверждение базируется на отдельных экспериментальных работах, обосновывающих идею об органической природе происхождения алмазов [Русанова, 1975], а также на наблюдаемых фактах пространственного совпадения алмазоносных кимберлитовых тел с областями широкого развития графитистых сланцев не только в Якутии, но также в Южной Африке (Кимберли) и в других регионах.

К коровым аномалиям электронно-проводящей (графитовой) природы, приуроченных к палеозойскому фундаменту, относятся также Норильская (31), Тунгусская (37), Минусинская (24) и Тимано-Печорская (14) (см. рис. 2). Последняя залегает на границе

между палеозоем и докембрием. Связь перечисленных проводников с графитистыми отложениями устанавливается на основании резкой неоднородности аномалий, крайне низкого удельного сопротивления слагающего их вещества (0,1—10 Ом·м), отсутствия корреляции их положения с характером температурного поля и с мощностью осадочного чехла, а также на основе геологических данных и результатов бурения, позволяющих обнаруживать углисто-графитистое вещество на восходящих участках коровых проводящих слоев, непосредственно под осадочным чехлом [Поддоловлин, Габлин, 1984]. С некоторыми из этих аномалий коррелируют месторождения полезных ископаемых (руды, углеводороды).

Особый интерес вызывает Сахалинская аномалия электропроводности (22 на рис. 2). Она представляет собой две полосовидные зоны, вытянутые вдоль северной части острова, согласно простиранию главных тектонических элементов кристаллического фундамента, перекрытого мощным покровом осадочных отложений. Природу аномалий принято определять как флюидную [Альперович, Никифоров, 1979]. Однако такое истолкование не согласуется с характером температурного поля, которое на всей территории Сахалина имеет монотонное распределение со средними значениями 40—50 мВт/м². Непосредственно в районе аномалии, в ее южной части наблюдается даже уменьшение геотермического градиента с 20 до 10—15 °С/км. На рис. 2 Сахалинская аномалия показана как электронно-проводящая. Основанием для этого, наряду с приведенными выше соображениями, послужили результаты выполненных А. А. Жамалетдиновым в 1981 г. измерений электропроводности пород на обнажениях углеродистых сланцев Сусунайского поднятия, расположенного на южном продолжении восточной аномальной полосы. По внешнему виду и составу эти породы мало отличаются от кварц-хлорит-серицитовых углеродистых сланцев Имандра-Варзугской аномалии электропроводности на Балтийском щите и обладают пониженным сопротивлением в первые сотни омметров. Можно полагать, что эти же породы, будучи погруженными под осадочный чехол, в условия достаточно высокого метаморфизма (амфиболитовой или зеленосланцевой фаций), могли приобрести высокую электронную проводимость и вызвать наблюдаемую магнитотеллурическую аномалию.

Докембрийский кристаллический фундамент. Коровые аномалии электропроводности, связываемые с докембрийским кристаллическим фундаментом, наиболее распространены в пределах Восточно-Европейской плиты. Крупнейшая из них, Кировоградская аномалия (10 на рис. 1), пересекает Украинский щит и протягивается в субмеридиональном направлении более чем на 600 км. Аномалия установлена и прослежена методом магнитовариационного профилирования [Рокитянский, 1975]. Максимальная глубина ее залегания оценивается в 25—30 км.

Существуют два альтернативных варианта истолкования природы Кировоградской аномалии. Согласно первому варианту, развиваемому первооткрывателем аномалии И. И. Рокитянским [1975], предполагается, что аномальный объект имеет флюидную природу и обусловлен нестационарным тепловым полем, еще не достигшим земной поверхности и поэтому не создающим аномального повышения плотности теплового потока в современном эрозионном срезе.

Согласно второму варианту интерпретации, развиваемому одним из авторов настоящей статьи, Кировоградская аномалия представляет собой древний рифт, заполненный вулканогенно-осадочными толщами с прослоями сульфидно-углеродистых пород, выходящих непосредственно под осадочный чехол. Следы их обнаруживаются в этом районе в кристаллическом фундаменте по геологическим данным и по результатам частотных зондирований [Рокитянский и др., 1983].

Наглядной иллюстрацией корового проводника, обнаруживаемого под осадочным чехлом в толще докембрийского фундамента, является Фроловская аномалия (15 на рис. 1). Аномалия установлена по результатам глубинных зондирований с ЛЭП постоянного тока 800 кВ «Волгоград—Донбасс» [Жамалетдинов и др., 1982]. Продольная проводимость ее достигает 2 тыс. См. Пространственно Фроловская аномалия приурочена к позднепротерозойскому фундаменту, сложенному терригенно-осадочными породами. В их составе, согласно данным бурения, широко развиты углисто-графитистые образования. В районе аномалии на глубине 2,8 км вскрыт фонтанирующий выход нефти из девонского горизонта, залегающего непосредственно на кровле фундамента. Этот факт имеет принципиальное значение, поскольку позволяет предположить, в соответствии с идеей

об «углеводородном дыхании» [Сидоренко, Сидоренко, 1975], что органические остатки первично-осадочных толщ фундамента в ходе их преобразования в графит могли служить поставщиками жидких и газообразных углеводородов в вышележащие осадочные толщи.

Результаты этого процесса проявились в том, что положение корового проводника графитовой природы, залегающего в кристаллическом фундаменте, пространственно совпадает со скоплениями нефти в перекрывающем осадочном чехле. Аналогичные пространственные связи наблюдаются также в районах расположения Тимано-Печорской (14), Вилюйской (23), Сахалинской (22) и других аномалий, описанных выше. Наряду с этим отметим, что повсеместной прямой корреляции положения коровых электронно-проводящих объектов в кристаллическом фундаменте со скоплениями нефти в вышележащих осадочных толщах нет и не может быть, поскольку условия накопления углеводородов определяются большим количеством других факторов, не укладываемых в рамки одной схемы. В частности, при таких изысканиях необходимо учитывать высокую способность углеводородов к миграции на большие расстояния. Это явление детально описано в работе [Карагодин, 1994] на примере гигантских месторождений нефти Западной Сибири, мигрировавших по латерали на многие десятки километров относительно материнских битуминозных отложений глубокозалегающей баженовской свиты.

В заключение обзора на рис. 6 представлена схема расположения аномалий электропроводности земной коры на территории восточной части Балтийского щита и северо-запада Восточно-Европейской платформы [Zhamaletdinov, 1980; Жамалетдинов, Ковтун, 1993; Жамалетдинов, 1996]. Верхние кромки аномалий выходят либо на земную поверхность (на щите), либо под подошву осадочного чехла (на Восточно-Европейской платформе). Сами объекты разделяются на два типа. Первый тип — узкие вытянутые зоны (полосы) проводимости, имеющие, в первом приближении, вид двумерных объектов. Их оси выделены жирными линиями. Как правило, они характеризуются высокой продольной проводимостью — в тысячи сименсов и более. Второй тип проводников определяет широкие области пониженного сопротивления кристаллического фундамента вследствие широко распространения ветвящихся сульфидно-

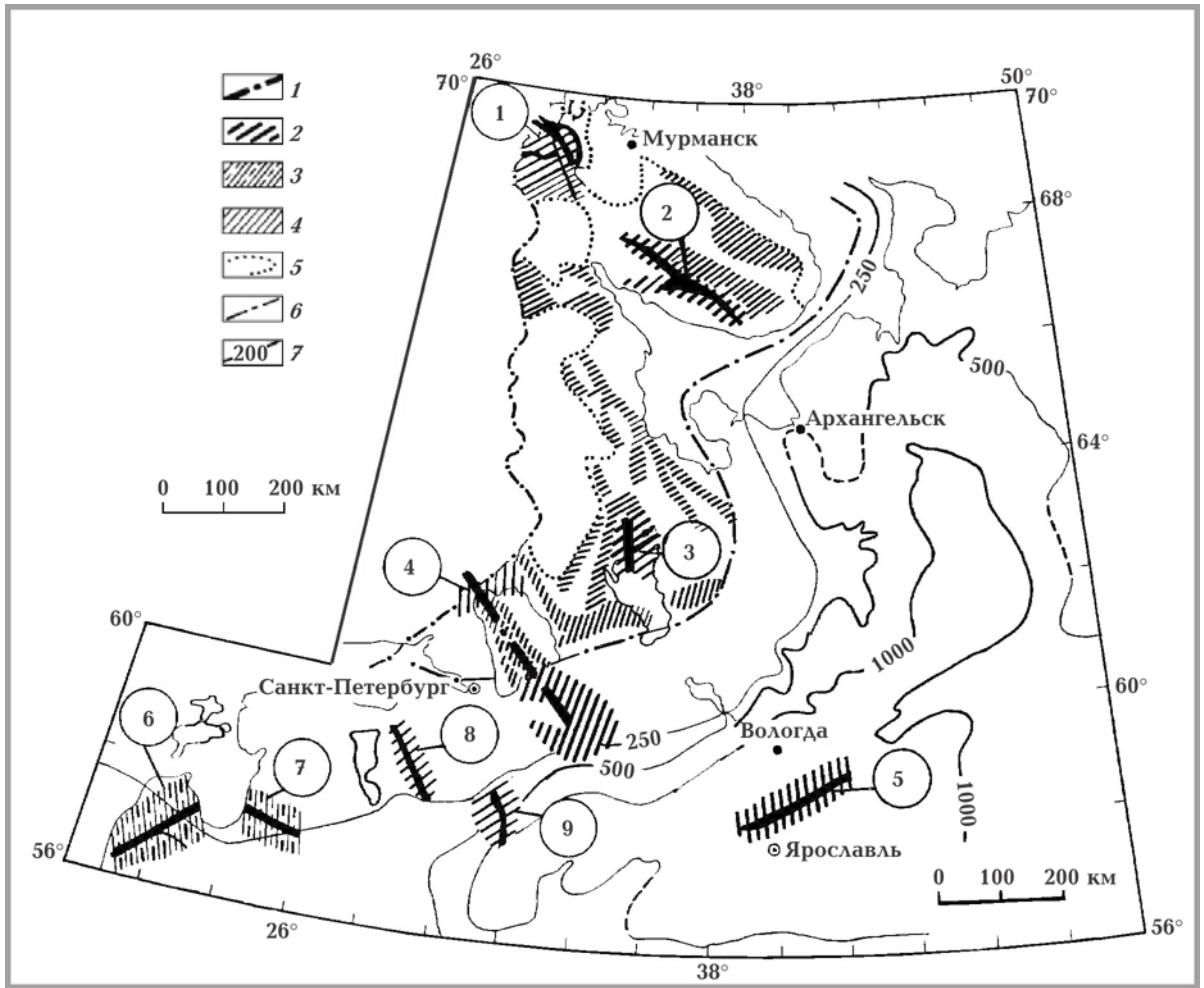


Рис. 6. Схема расположения коровых аномалий электропроводности восточной части Балтийского щита и его обрамления [Жамалетдинов, Ковтун, 1993]: 1 — оси линейных зон проводимости ($S=1000$ См и более); 2—4 — широкие области высокой и повышенной электропроводности земной коры: 2 — $S>1000$ См, 3 — $S=100\div 1000$ См; 4 — $S=10\div 100$ См; 5 — области аномально высокого сопротивления верхней, 10-километровой, толщи земной коры ($S<0,2$ См); 6 — граница Балтийского щита; 7 — изолиния продольной проводимости осадочного чехла, См; наиболее крупные коровые аномалии электропроводности (цифры в кружках): 1 — Печенгско-Аллареченская, 2 — Имандра-Варзугская, 3 — Онежская, 4 — Ладожская, 5 — Любимская, 6 — Кулдино-Лиепайская, 7 — Валмиеро-Лакновская, 8 — Чудская, 9 — Ильменская.

графитовых зон проводимости. Продольная проводимость их изменяется от десятков до тысяч сименсов. Слабые аномалии в десятки сименсов выделяются только на щите и не обнаруживаются под осадочным чехлом.

Интенсивные полосовые аномалии выделяются одинаково уверенно как на щите, так и под платформенным чехлом. Одна из них, Ладожско-Ботническая (18 на рис. 1, 4 на рис. 6), непрерывно прослеживается с территории щита на платформу, под осадочный чехол. Далее на юг просматривается ее возможное соединение с Кировоградской аномалией (16 на рис. 1). На территории Балтийского щита аномалия хорошо изучена. Она была открыта И. И. Рокитянским [1975] и затем деталь-

но исследована А. А. Ковтун и ее коллегами [Ковтун и др., 1984; Ковтун, 1989]. Эпицентр аномального тела был определен на глубине 10 км, а ее природа связывалась, как и природа Кировоградской аномалии, с высокотемпературной областью обогащения пород флюидами. Отсутствие аномалии теплового потока над проводящим объектом объяснялось фактором времени, тем, что тепловой фронт еще не достиг земной поверхности. Наряду с этим сопоставление положения оси глубинного проводника с приповерхностной геологией показывает, что к нему приурочены горизонты черных углеродистых сланцев и пирит-пирротинистых пород. На северо-западе, на территории Финляндии, ось проводника про-

ходит через медно-никелевое рудное поле Миккели и далее разветвляется на северо-запад и запад (18 на рис. 1). Северо-западная ветвь образует Ладожско-Ботническую зону (Цветной пояс Финляндии), западная ветвь уходит параллельно Финскому заливу в сторону Швеции, где, по данным эксперимента BEAR, устанавливается ее продолжение в районе оз. Веннерн [Жамалетдинов, 1996].

3. Дискуссия о природе проводящих объектов в земной коре

Как отмечалось выше, по вопросу о природе аномалий электропроводности в земной коре и верхней мантии развиваются две концепции — флюидная и электронно-проводящая. Обе концепции в той или иной мере опираются на геодинамические построения.

Флюидная модель электропроводности литосферы. Наиболее полное описание флюидной модели электропроводности литосферы и геотектонических следствий выполнено С. Н. Куликом в книге [Азаров и др., 2005, с. 108—105]. Ниже рассмотрены самые общие положения. Согласно флюидной концепции, в глубинных слоях земной коры предполагается существование связанных систем поровых пространств, заполненных соляными растворами. При этом, согласно статье [Yardley, Valley, 1997], необходимо учесть, что возможность наличия свободных водных растворов в низах континентальной коры стабильных кратонов (древних платформ и щитов) практически исключена, поскольку вода поглощается мафическими породами и переходит в кристаллизационно связанное состояние. Поэтому в качестве наиболее реального механизма образования жидкой фракции (флюидов) на глубине обычно принимается температурная дегидратация, наблюдаемая при температурах 500—600 °С для пород низких степеней метаморфизма типа серпентинитов или амфиболовых сланцев [Keller et al., 1966; Любимова, Фельдман, 1975]. Дегидратация, освобождение воды из кристаллической решетки может происходить в условиях тектонически активных зон, где тепловое поле нестационарно и на границах температурных фронтов могут находиться надкристаллические растворы в межзерновых пространствах горных пород. Исходя из наиболее общих физических соображений, можно сформулировать следующие требования, которым должны удовлетворять флюидные аномалии.

Первое требование связано с глубиной расположения флюидных аномалий. Глубина

расположения определяется минимальной требуемой температурой дегидратации горных пород — 500—600 °С. На щитах эта температура соответствует глубине 45—50 км.

Второе требование связано с геотектоническим режимом. Оно сводится к требованию, чтобы аномалия электропроводности находилась в области постоянного подтока тепла, необходимого для поддержания процессов высвобождения кристаллизационно связанной воды. Указанные условия соблюдаются только в зонах молодой активизации, в рифтовых впадинах, где процессы дегидратации могут происходить на глубинах 10—15 км и менее.

Третье, сугубо качественное, требование основано на эмпирических соображениях о том, что флюидные аномалии должны характеризоваться плавными границами, слабыми пространственными градиентами поля, небольшой анизотропией или ее отсутствием и значительными размерами, сопоставимыми с глубиной их залегания.

Наконец, четвертое требование связано с оценкой минимального значения удельного сопротивления влагонасыщенных горных пород на глубине с учетом влияния температуры и давления. Согласно работе [Фельдман, Жамалетдинов, 2009], эта величина не может быть меньше 1000 Ом·м. Рассмотрим данный вопрос подробнее на основе лабораторных исследований. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) трещиноватых пород достаточно быстро возрастает с ростом давления до 150—200 МПа и определяется объемным сжатием [Lee et al., 1983]. У разновидностей одних и тех же пород эта величина, фактически соответствующая пористости за счет трещиноватости, может быть разной. При дальнейшем увеличении давления УЭС определяется «чистой» пористостью и возрастает у различных пород в 10—100 раз (рис. 7, а).

Увеличение температуры приводит к уменьшению УЭС на несколько порядков, причем графики зависимостей выстраиваются при больших температурах (свыше 300 °С) (рис. 7, б). Поверхностная проводимость (по границам кристаллов) начинает проявляться только при практическом отсутствии проводимости по трещинам и низкой пористости, менее 0,01 %. Для таких пород она определяет некоторый верхний предел УЭС. В реальных условиях вклад данного механизма проводимости крайне мал.

При пористости 1—2 % сопротивление

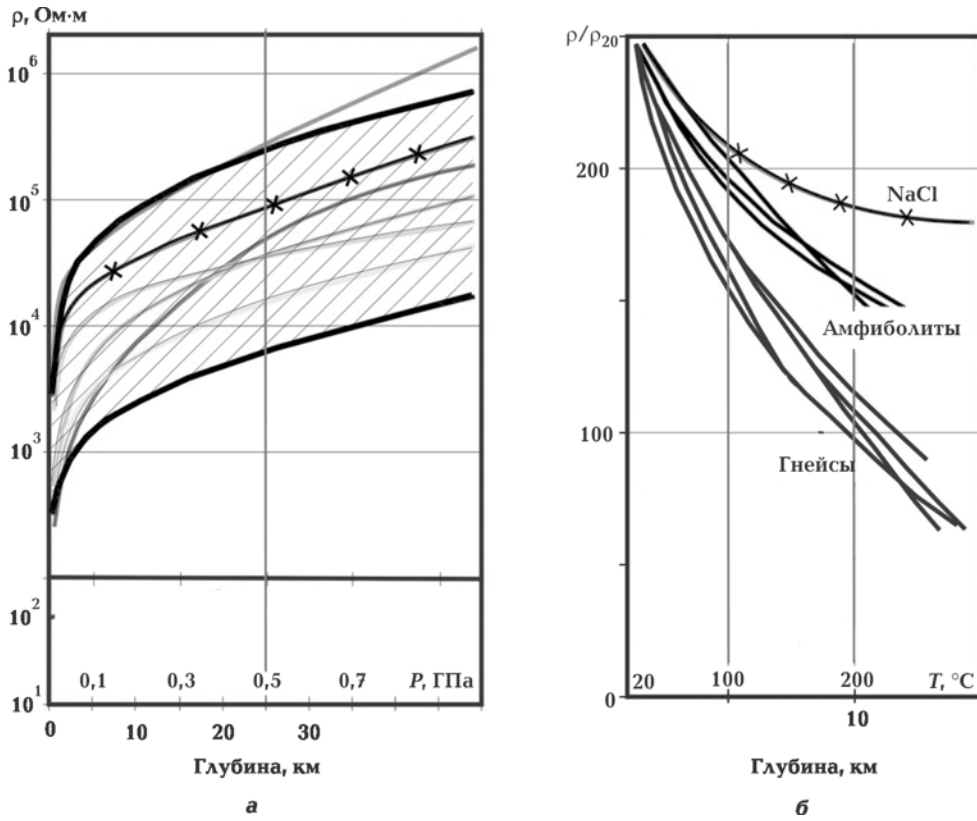


Рис. 7. Зависимость удельного электрического сопротивления от давления (а) и температуры (б) для горных пород при их полном насыщении минерализованными растворами и для водного раствора NaCl с содержанием 0,05 г/л [Lee et al., 1983].

уменьшается на 2—3 порядка при небольших давлениях и температурах, однако не может быть меньше 10^3 Ом·м при сопротивлении растворов 0,3 Ом·м. С ростом давления и температуры, примерно соответствующим увеличению глубины в пределах земной коры ($P=1,2\div 1,5$ ГПа, $T=400\div 600$ °С), происходит возрастание сопротивления в 5—8 раз при росте давления и уменьшении сопротивления на 2—3 порядка за счет температуры (рис. 7). При этих оценках сопротивление метаморфических и магматических пород должно лежать в диапазоне $10^4\text{—}10^5$ Ом·м. Если увеличить минерализацию водных растворов или флюидов до 300 г/л и тем самым уменьшить их сопротивление до минимально возможной величины 0,03 Ом·м, то приведенные выше оценки опустятся до нижнего предела $10^3\text{—}10^4$ Ом·м. Это согласуется с результатами работ по изучению УЭС горных пород в лабораторных условиях при высоких значениях давления и температуры и их обобщением, выполненным М. П. Воларовичем, А. Т. Бондаренко и Э. И. Пархоменко [Воларович и др., 1966].

В тех случаях когда глубинные (коровые)

аномалии электропроводности не укладываются в рамки перечисленных выше требований к условиям проявления флюидного механизма, их природу принято трактовать с позиции электронно-проводящей концепции.

Электронно-проводящая концепция. Идея об электронно-проводящей природе коровых аномалий впервые была обоснована профессором Санкт-Петербургского университета А. С. Семеновым [1970]. Она основана на экспериментально устанавливаемой исключительной распространенности в земной коре аномалий проводимости, обусловленных наличием графита и сульфидно-углеродистых образований. Аномалии охватывают широкий диапазон возрастных групп — от интенсивно дислоцированных и метаморфизованных пород позднего архея и протерозоя до палеозоя и зон альпийской складчатости.

Представленный выше анализ указывает на исключительную распространенность в земной коре на территории России электронно-проводящих аномалий, обусловленных наличием графита и сульфидно-углеродистых образований. Они охватывают широкий

диапазон возрастных групп — от интенсивно дислоцированных и метаморфизованных пород позднего архея и протерозоя до палеозоя и относительно слабо метаморфизованных пород мезозоя.

Аномалии электропроводности флюидной природы наблюдаются, в основном, в областях молодого вулканизма, например на Камчатке [Мороз, 1991]. С флюидами принято связывать региональное понижение сопротивления в верхней мантии, на глубинах 110—140 км, как это наблюдается в пределах обширной Восточно-Сибирской аномалии (30 на рис. 1) [Ваньян, 1984; Бердичевский и др., 1969].

По мере увеличения объема экспериментальных данных глубинных зондирований и повышения детальности исследований становится ясно, особенно на примере Балтийского щита, что «зараженность» земной коры аномалиями электропроводности столь велика, что это свойство становится нормой, тогда как участки земной коры с однородным (по латерали) высоким сопротивлением на всю ее мощность являются редко встречающимися аномалиями.

Во многих случаях по данным формальной интерпретации результатов глубинных зондирований коровые аномалии определяются в виде промежуточных проводящих слоев, залегающих на глубинах от единиц до первых десятков километров. Однако более правильно интерпретировать их крутозалегающими, иногда пологонаклонными зонами или системами зон проводимости, выходящими под осадочный чехол, под трапповые поля или под более молодые эффузивно-осадочные комплексы.

По вопросу о природе сульфидно-углеродистых аномально проводящих объектов результаты наших исследований в наибольшей мере согласуются с идеей об их первично-осадочном биогенном происхождении. Согласно биогенной концепции, на раннем этапе развития Земли произошло резкое изменение характера геологических процессов в связи с появлением атмосферы, гидросферы и фотосинтезирующих бактерий [Виноградов, 1962]. С этого рубежа (3—3,5 млрд лет назад) возникла и начала активно развиваться органическая жизнь. Наиболее интенсивно она протекала в мелководных бассейнах, где накапливалось и захоронялось органическое вещество. Одновременно эти области испытывали погружения, сопровождавшиеся дизъюнктивными тектоническими движениями,

эрозионными явлениями и осадконакоплением. Глубокий метаморфизм приводил к удалению летучих и к структурной перестройке вещества. Богатые сероводородом органические остатки преобразовывались в характерные переслаивающиеся пачки сульфидно-графитистых пород.

Описанная область крупных геологических преобразований, обусловленных биогеохимической и вулканической деятельностью, получила название супраструктуры, а соответствующие геологические комплексы — супракрустальных, или залегающих на первичной коре наиболее раннего, нуклеарного, этапа развития Земли.

Представленная схема образования графита в земной коре находит подтверждение в результатах наших исследований, прежде всего в том, что электронно-проводящие сульфидно-графитистые толщи всегда наблюдаются в составе супракрустальных вулканогенно-осадочных толщ; они залегают согласно с горизонтами первично-осадочных пород и, будучи их компонентом, отражают литолого-стратиграфические особенности строения соответствующих геологических структур.

С биогенно-осадочной концепцией происхождения графита согласуется также вытекающая из экспериментальных данных общая схема распространения электронно-проводящих (графитовых) коровых аномалий в планетарном масштабе — это огромные проводящие включения, покровные образования, наблюдаемые иногда в виде разломов, шарьяжей или рифтообразных структур и залегающие в виде неоднородного, мозаичного слоя SC (Sulfide and Carbon bearing layer) на неровной поверхности древнейшего плохо проводящего и относительно однородного протофундамента, сформированного на самой ранней, «нуклеарной», стадии развития Земли. В честь первооткрывателя идеи об электронно-проводящей природе коровых аномалий профессора Александра Сергеевича Семенова этому феномену придано обозначение «SC-слой Семенова». Понятие «слой» в данном случае имеет сугубо условное значение, поскольку область распространения электронно-проводящих образований характеризуется крайней неоднородностью как по вертикали, так и по латерали. В заключение, ссылаясь на работу [Фельдман, Жамалетдинов, 2009], приведем основные представления о тех требованиях, которые могут и должны приниматься во вни-

вание при решении вопроса о природе аномалий электропроводности, обнаруживаемых в земной коре.

1. В тектонически стабильных регионах, где термодинамические условия, необходимые для процессов преобразования пород под действием метаморфизма и плавления, не достигаются, вода в глубоких горизонтах находится в кристаллизационно связанном состоянии. Поступающая из мантии вода в этих условиях кристаллизационно связывается в нижней части земной коры, не изменяя существенно их электропроводность. Сопротивление всех магматических и метаморфических пород, которые должны преобладать в составе земной коры и прилегающей мантии при соответствующих термодинамических условиях, остается достаточно большим.

2. В тектонически активных регионах в земной коре при выполнении ряда условий могут происходить процессы дегидратации и плавления, которые сопровождаются образованием флюидов, как ионных проводников. Последние образуют связные системы и могут существенно изменять физические свойства пород. Причем флюиды составляют не более 1—2 % общего объема пород. Наличие водных растворов или флюидов в количе-

стве 1—2 % общего объема образуют связную структуру, которая, будучи значительно более проводящей, понижает сопротивление горных пород на 2—3 порядка. При этом нижний предел удельного электрического сопротивления земной коры на глубине составляет 1000 Ом·м.

3. Все аномалии электропроводности в земной коре, характеризующиеся удельным сопротивлением пород ниже 10^3 Ом·м, необходимо интерпретировать в рамках других концепций, не имеющих отношения к флюидной природе проводимости. В качестве наиболее приемлемой концепции в этом случае нам представляется электронно-проводящая [Семенов, 1970], хотя не исключаются и другие механизмы понижения сопротивления пород, например за счет газовой-жидких включений.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-05-12033-офи-м-2011 и гранта ОНЗ РАН № 6 (научные руководители академики А. О. Глико и Ф. П. Митрофанов). Автор выражает глубокую благодарность Т. К. Бурахович за инициативу в написании статьи и помощь в подборе материала. Неоценимую помощь в подготовке и оформлении рукописи оказала Т. Г. Короткова.

Список литературы

- Азаров Н. Я., Анциферов А. В., Шеремет Е. М., Глевасский Е. Б., Есипчук К. Е., Кулик С. Н., Сухой В. В., Николаев Ю. М., Николаев И. Ю., Пигулевский П. И., Шпильчак В. А., Сетая Л. О., Волкова Т. П., Борогина Б. В. Геолого-геоэлектрическая модель Орехово-Павлоградской шовной зоны Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 2005. — 190 с.
- Альперович И. М., Никифоров В. М. Аномалии проводимости в земной коре о. Сахалина // Докл. АН СССР. — 1979. — 244, № 5. — С. 1194—1196.
- Бабаджанов Т. П., Басов М. Д., Гатина Р. М., Аширматов А. С., Белявский В. В., Каржаев А. Т., Таль-Вирский Б. В., Дубровский В. Т., Бергичевский М. Н., Яковлев А. Т., Файнберг Э. Б. Южно-Тянь-Шаньская аномалия электропроводности // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1986. — № 6. — С. 79—90.
- Бакиров А. Б. Эндогенные геологические формации Тянь-Шаня // Метаморфические формации. — Фрунзе: Илим, 1984. — 215 с.
- Бергичевский М. Н., Борисова В. Н., Бубнов Г. Н. Аномалия электропроводности земной коры Якутии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1969. — № 10. — С. 22—41.
- Ваньян Л. Л. Электропроводность земной коры в связи с ее флюидным режимом // Коровые аномалии электропроводности. — Ленинград: Наука, 1984. — С. 27—35.
- Виноградов А. П. Изотопы кислорода и фотосинтез. — Москва: Изд-во АН СССР, 1962. — 32 с.
- Воларович М. П., Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Исследование электросопротивления основных, ультраосновных и щелочных горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах // Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях. — Москва: Наука, 1966. — С. 168—179.
- Гиллули Д. Тектонические движения, связанные с эволюцией горных хребтов // Природа твердой Земли / Под ред. Ю. Робертсона. — Москва: Мир, 1975. — С. 225—251.

- Жамалетдинов А. А. Графит в земной коре и аномалии электропроводности // Физика Земли, 1996. — № 4. — С. 12—29.
- Жамалетдинов А. А., Ковтун А. А. Схема электропроводности северо-восточной части Балтийского щита. Параметры нормального разреза // Строение литосферы Балтийского щита. — Москва: МГК РАН, 1993. — С. 86—88.
- Жамалетдинов А. А., Ковалевский В. Я., Павловский В. И., Таначев Г. С., Токарев А. Д. Глубинное электроразведывание с ЛЭП постоянного тока 800 кВ «Волгоград—Донбасс» // Докл. АН СССР. — 1982. — 265. — С. 1101—1105.
- Жамалетдинов А. А., Семенов А. С. Электроннопроводящие породы кристаллического фундамента — объект глубинных электрических зондирований // Коровые аномалии электропроводности. — Ленинград: Наука, 1984. — С. 8—21.
- Карагодин И. Н. Источник углеводородов гигантских скоплений нефти в неокомских отложениях Западной Сибири // Докл. АН. — 1994. — 334, № 4. — С. 484—488.
- Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. — Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. — 284 с.
- Ковтун А. А., Вагин С. А., Коквина Е. Л., Порохова Л. Н., Чичерина Н. Д. Ладожская и Чудская аномалии электропроводности в земной коре // Коровые аномалии электропроводности. — Ленинград: Наука, 1984. — С. 49—55.
- Любимова Е. А., Фельдман И. С. Тепловой поток, температура и электропроводность земной коры и верхней мантии Земли // Кора и верхняя мантия Земли. — Москва: Изд-во МГУ, 1975. — Вып. 2. — С. 144—190.
- Матковский О. Е., Кульчещкая А. А. Графит // Минералы Украинских Карпат. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 45—51.
- Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. — Москва: Наука, 1991. — 180 с.
- Подловиллин Е. С., Габлин Н. С. Геологическое строение фундамента Тимано-Печорской провинции по результатам исследований магнитотеллурическими методами // Коровые аномалии электропроводности. — Ленинград: Наука, 1984. — С. 101—107.
- Полторацкая О. Л., Панарин В. П., Попов Г. И. Западно-Якутская аномалия электропроводности // Коровые аномалии электропроводности. — Ленинград: Наука, 1984. — С. 116—122.
- Рокитянский И. И. Исследования аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования — Киев: Наук. думка, 1975. — 279 с.
- Рокитянский И. И., Шуман В. Н., Логвинов И. Н., Лысенко Е. С., Павловский В. И., Жамалетдинов А. А., Токарев А. Д., Захарова В. И. Частотные зондирования под Кировоградской аномалией проводимости // Геофиз. журн. — 1983. — 5, № 2. — С. 88—90.
- Русанова О. Д. К вопросу об источнике углерода природных алмазов // Древняя кора выветривания гипербазитов Северного Урала: Тр. Свердл. горн. ин-та. — 1975. — Вып. 118. — С. 105—118.
- Семенов А. С. Природа электрической проводимости древнего кристаллического фундамента // Вестн. ЛГУ. — 1970. — № 12. — С. 19—26.
- Сигоренко Св. А., Сигоренко А. В. Органическое вещество в осадочно-метаморфических породах докембрия. — Москва: Наука, 1975. — 115 с.
- Фельдман И. С. Природа проводимости земной коры и верхней мантии // II Всерос. школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли: Лекции, тезисы. — Москва: МАКС Пресс, 2005. — С. 68.
- Фельдман И. С., Жамалетдинов А. А. Флюидная и тепловая модели электропроводности литосферы по лабораторным данным // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов: Тр. Всерос. (с междунар. участием) конф. — Апатиты: Геол. ин-т КНЦ РАН, 2009. — С. 100—107.
- Шапиро В. А. Урало-Тянь-Шаньская аномалия электропроводности // Докл. АН СССР. — 1988. — 299, № 3. — С. 598—602.
- Adam A. Appearance of the electrical inhomogeneity and anisotropy in the results of the complex electrical exploration of the Carpathian Basin // Acta Geod. Geophys. Mont. Hung. — 1969. — 4. — P. 187—197.
- Adam A. Graphite/graphitic rocks as cause of the electric conductivity anomaly and their relationship to the tectonics — a review // Acta Geol. Hung. — 2005. — 40 (3-4). — P. 391—411.
- Arora B. R. Magnetometer array studies in India: present status, data interpretation and assessment of numerical modelling results // Proceed. the Indian Academy of Sciences. Earth and Planetary Sciences. — 1990. — 99, iss. 4. — P. 693—716.

- Blohm E. K., Worzyk P., Scriba H.* Geoelectrical deep soundings in Southern Africa using the Cabora Bassa power line // *J. Geophys.* — 1977. — **43**. — P. 665—679.
- Brasse H., Lezaeta P., Rath V., Schvalenberg K., Soyer W., Yaak V.* The Bolivian Altiplano conductivity anomaly // *J. Geophys. Res.* — 2001. — 10.1029/2001 JB 000391.
- Brasse H., Lezaeta P., Rath V., Schwabner K., Soyer W., Haak V.* The Bolivian Altiplano conductivity anomaly // *J. Geophys. Res.* — **107**, № 5, B5. — 10.1039/2001.JB000391/2002.
- Camfield P. A., Gough D. I.* A possible Proterozoic plate boundary in North America // *Can. J. Earth Sci.* — 1977. — **14**. — P. 1229—1238.
- Cermak V., Pibakh L.* The Heat Field of Europe. — Москва: Мир, 1982. — 376 с.
- Chen L., Booker J. R., Jones A. G., Wu N., Unsworth M. J., Wei W., Tan H.* Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying // *Science*. — 1996. — **274**. — P. 1694—1695.
- Chen, Chien-Chih, Chen Chow-son.* Preliminary report on the Sanyi-Puli seismic zone conductivity anomaly and its correlation with velocity structure and seismicity in the Northwestern Taiwan // *Letter Earth Planets Space*. — 2000. — **52**. — P. 377—381.
- Gupta J. C., Kurtz P. A., Camfield P. A., Niblett E. R.* A geomagnetic induction from IMS data near Hudson Bay, and its relation to crustal electrical conductivity in central America // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* — 1985. — **81**. — P. 33—46.
- Handa S., Camfield P. A.* Crustal electrical conductivity in north-central Saskatchewan: The North American Central Plains anomaly and its relation to a Proterozoic plate margin // *Canad. J. Earth Sci.* — 1984. — **21**. — P. 533—543.
- Hess H. H.* History of ocean basins // *Petrologic studies. A. F. Baddington vol.* // *Geol. Soc. Amer.* — 1962. — P. 599—620.
- Jones A. G., Craven J. A.* The North American central plains anomaly and its correlation with gravity, magnetic, seismic, and heat flow data in Saskatchewan, Canada // *Phys. Earth Planet. Int.* — 1990. — **60**. — P. 169—194.
- Jones A. G., Savage P. J.* North American central plains conductivity anomaly goes East // *Geophys. Res. Lett.* — 1986. — **13**. — P. 685.
- Keller G. V., Anderson L. G., Pritchard Y. I.* Geological survey investigation of the crust and upper mantle // *Geophysics*. — 1966. — № 6. — P. 1078—1087.
- Kennett B. L. N.* Seismic structure in the mantle beneath Australia // *Austr. J. Earth Sci.* — 2002. — **999**. — P. 888—999.
- Kulik S. N.* High conductivity anomalies in the Continental Earth Crust // *Proceed. of the Institute of fundamental studies*. — Kyiv: Logos, 2004. — P. 14—21.
- Lee C. D., Vine F. J., Ross R. G.* Electrical conductivity models for the continental crust based on laboratory measurements on high-grade metamorphic rocks // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* — 1983. — **72**. — P. 353—371.
- Lilley F. E. M., Wang L. J., Chamalaun F. H., Ferguson I. J.* The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate // *GSA Monograph*. — 2001. — **201**. — P. 1—16.
- Porath H.* Magnetic variation anomalies and seismic low-velocity zone in the western United States // *JGR*. — 1971. — **76** (11). — P. 2643—2648.
- Porath H., Oldenburg D. W., Gough D. I.* Separation of magnetic variation fields and conductive structures in the western United States // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* — 1970. — **19** (3). — P. 237—260.
- Sakkas V., Meju M. A., Khan M. A., Haak V., Simson F.* Magnetotelluric images of the crustal structure of Chyulu Hills volcanic field, Kenya // *Tectonophysics*. — 2002. — **346**. — P. 169—185.
- Schmucker U.* Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States // *Bull. Scripps. Institute Oceanography*. — 1970. — **13**. — 165 p.
- Semenov V. U., Jozwiak W., Pek J.* Deep Electromagnetic Soundings Conducted in Trans-European Suture Zone // *Eos, Transactions, Amer. Geophys. Union*. — 2003. — **84**, № 52. — P. 581—584.
- Soyer W., Brasse H.* A magneto-variation array study in Central Andes of N. Chile and SW Bolivia. // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — **28**. — P. 3023—3026.
- Stanley W. D.* Comparison of geoelectrical/tectonic models for suture zones in the western U. S. A. and Eastern Europe: are black shales a possible source of high conductivities? // *Phys. Earth Planet. Int.* — 1989. — **53**. — P. 228—238.
- Wiese H.* Geomagnetische Tiefentellurik. Teil III: Die geomagnetischen Variationen in Mittel- und Sudost-Europa als Indikator der Streichrichtung grossraumiger elektrischer Untergrundstrukturen

- // *Geofisica pura et applicata*. — 1963. — **56**. — P. 101—114.
- Yardley B. W. D., Valley J. W.* The petrologic case for a dry lower crust // *J. Geophys. Res.* — 1997. — B6. — P. 12,173—12,185.
- Zhamaletdinov A. A.* Electron-conducting structures of the North-West of the Kola peninsula and their influence on results of the deep soundings of the Earth crust // *Geod. geophys. Veroff.* — 1980. — R. 111, H. 47. — P. 207—223.
- Zhamaletdinov A. A.* On Electronically Conductive Nature of the Carpathians anomaly (Goelectric, Geothermal and Geodynamic aspects) // *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* — 2005. — C-95 (386). — P. 43—58.