

П.С. Бабаянц, Ю.И. Блох, В.А. Буш, М.В. Минц, А.А. Трусов, И.Б. Филиппова

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ  
КАРТИРОВАНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА И ИЗУЧЕНИИ  
ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

При геологическом картировании и изучении глубинного строения территорий важнейшую роль играют данные аэромагниторазведки и аэрогравиразведки. Их экспресс-интерпретация дает возможность получать новые материалы, раскрывающие внутреннее строение и историю формирования кристаллического фундамента и служащие современной основой для региональных геологических исследований и минерагенических прогнозов.

На первом этапе интерпретации изучается рельеф кровли кристаллического фундамента. Обычно основой для этого служат данные сейсмических исследований (преимущественно наиболее надежных МОВ-ОГТ) и глубокого бурения иногда с привлечением информации, полученной с помощью глубинных электрических зондирований. Тем не менее, общая совокупность точек, где имеются более или менее надежные сведения о глубинах фундамента, как правило, остается весьма ограниченной, а их расположение в плане – чрезвычайно неравномерным. Формальная интерполяция в этой ситуации, очевидно, дает крайне ненадежные результаты, и тогда зачастую прибегают к заполнению получающихся лакун на основании корреляции рельефа фундамента с гравитационным полем изучаемого региона. Однако характер гравитационного поля лишь частично определяется морфологией поверхности фундамента. Значительный вклад в его структуру вносят как вещественные неоднородности в составе фундамента, так и образования осадочного чехла, а это, естественно, вносит свои погрешности в итоговые карты. В итоге там, где структурные карты кровли кристаллического фундамента построены разными исследователями, различия в альтитудах фундамента на них, как правило, составляют сотни метров, а зачастую заметно различается и общий структурный план.

Эффективность картирования поверхности кристаллического фундамента можно существенно повысить за счет привлечения дополнительной информации, получаемой с помощью аэромагнитной съемки. Основная часть энергии аномального магнитного поля (до 99%) зачастую обусловлена влиянием именно верхней части кристаллического фундамента, и для ее картирования магнитная съемка в большинстве платформенных регионов фактически является прямым методом. Проблема состоит лишь в разработке эффективных способов извлечения интересующей информации, на что в течение длительного времени направлялись значительные усилия. Одним из наиболее мощных из существующих в настоящее время средств решения указанной задачи является технология ROMGAS, реализованная в одноименной программе, обобщившая предыдущие достижения в этой области, которая базируется на определении координат особых точек функций, описывающих магнитные аномалии, по вычисляемому в скользящем окне амплитудному спектру [1]. С ее помощью и осуществляется картирование так называемой Главной магнитоактивной поверхности (ГМАП), т.е. верхней огибающей множества особых точек. Хотя на отдельных участках ГМАП в силу естественных геологических причин может располагаться как выше, так и ниже кровли фундамента, в целом в пределах плитной части платформ она приурочена преимущественно именно к данной границе. К настоящему времени с помощью программы ROMGAS проведено изучение рельефа кровли кристаллического фундамента примерно на 25% территории РФ. Большая часть изученной территории в свое время была покрыта Государственными аэромагнитными съемками масштаба 1:200 000, и относительная точность определения ГМАП по ним обычно не хуже 10%. В благоприятных условиях при наличии данных современных детальных аэромагнитных съемок эта точность оказывается значительно более высокой.

На рис. 1 показан кросс-плот, построенный по результатам сопоставления данных бурения 394 скважин в пределах Московской синеклизы с данными ROMGAS. Анализ показывает, что с помощью этой технологии по данным, являющимся на большей части территории результатами Государственной аэромагнитной съемки середины прошлого века, получены вполне достоверные результаты всюду, за исключением участков развития авлакогенов. Там верхние особенности в скользящем окне размерами 50×50 км, применявшимся для картирования ГМАП, расположены на бортах и, следовательно, не отражают истинных глубин дна авлакогена. Тем не менее, в итоге среднеквадратическая погрешность определения глубин поверхности кристаллического фундамента в пределах Московской синеклизы составила 267,5 м, коэффициент корреляции между глубинами по данным бурения и ROMGAS оказался равным 0,94.

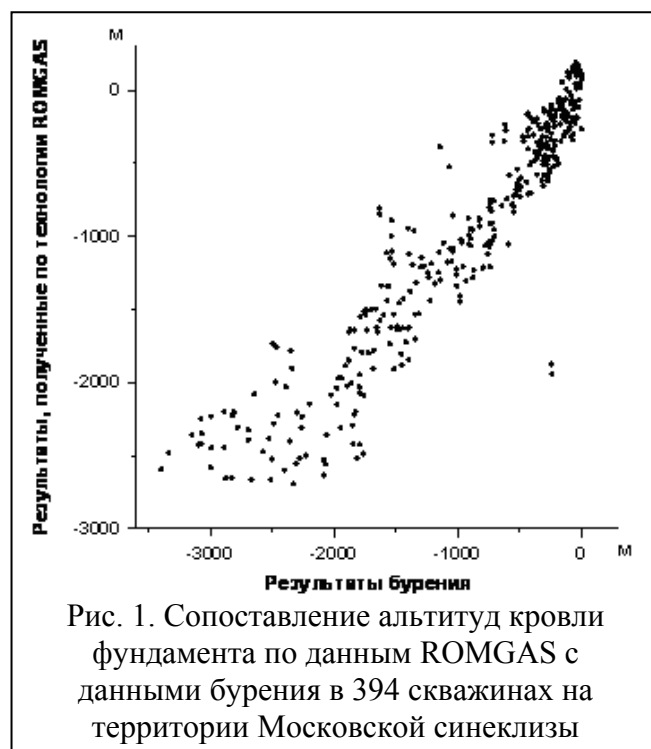


Рис. 1. Сопоставление альтитуд кровли фундамента по данным ROMGAS с данными бурения в 394 скважинах на территории Московской синеклизы

На втором этапе интерпретации осуществляется комплексное моделирование кристаллического фундамента, для чего применяется программа REIST из пакета SIGMA-3D, предназначенная для построения модели субгоризонтального слоя с латерально изменяющимися намагниченностью и плотностью [2]. Верхняя граница модели представляет собой контактную поверхность, совпадающую с кровлей фундамента, а нижняя полагается горизонтальной и располагающейся на глубине, определяемой на основании спектрального анализа полей. Данный слой разбивается на квадратные в плане призмы, размеры которых выбираются с учетом масштаба выполненных съемок и средних значений глубины кровли. По наблюдаемым полям с помощью итерационного метода определяется разность между плотностью и намагниченностью каждой из призм по отношению к одной из них, принимаемой в качестве базовой, а намагниченность пород считается преимущественно индуктивной и направленной по современному полю. В результате работы программы REIST однозначно (что следует из теоремы В.М.Новоселицкого, 1965) подбираются такие эффективные плотности и намагниченности аппроксимирующих элементов, поля от которых максимально совпадают с наблюдаемыми. Переход от эффективных значений петрофизических свойств к истинным может осуществляться путем сопоставления с данными изучения керна скважин.

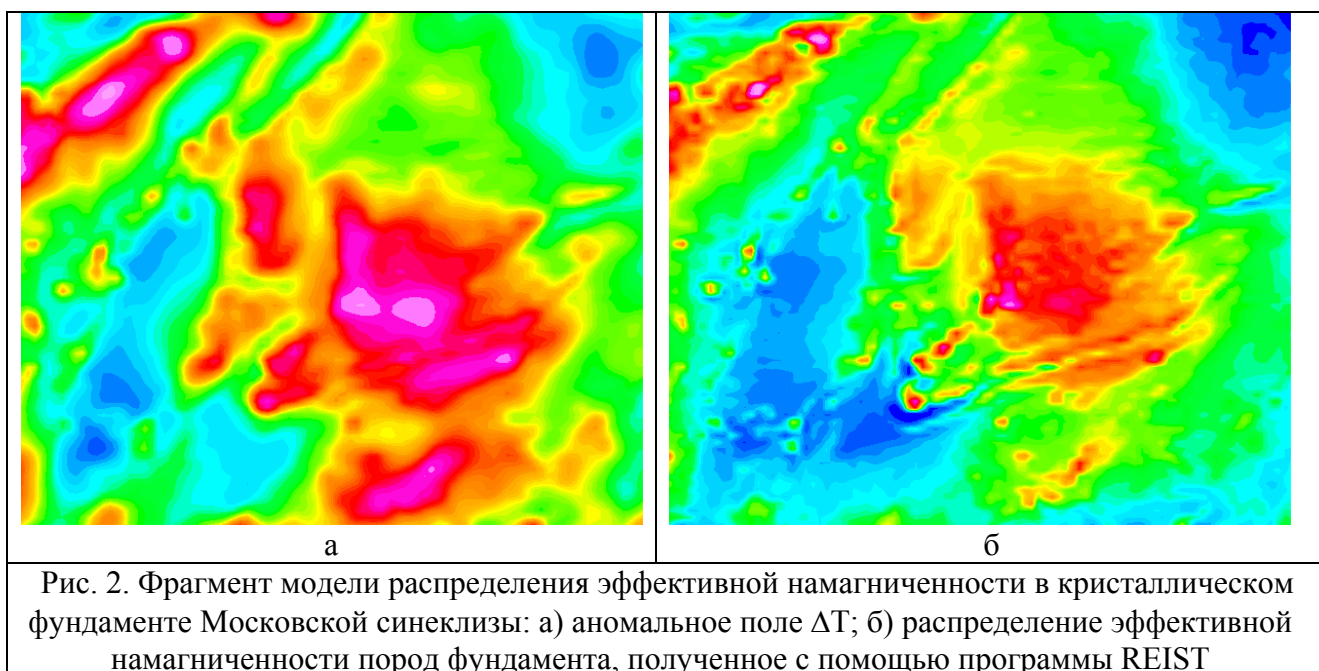
Реализованная в программе REIST технология предоставляет интерпретаторам следующие основные возможности:

- повышение эффективности геологического картирования по данным гравиразведки и магниторазведки за счет перехода от анализа наблюдаемых полей к анализу распределения эффективных физических свойств;
- упрощение и унификация геологической интерпретации магнитных аномалий  $\Delta T$  за счет устранения различий, связанных с разной направленностью геомагнитного поля в разных регионах Земли и связанным с ним направлением вектора намагниченности пород;
- ликвидация осложняющих локальных магнитных аномалий индуктивного происхождения, не связанных с геологическим строением, и упрощение обнаружения на их местах слабых локальных аномалий;
- выявление локальных объектов с высокой естественной остаточной намагниченностью, направление которой не совпадает с направлением современного геомагнитного поля: в этом случае на полученной карте распределения намагниченности

подобные объекты будут сопровождаться аномалией намагниченности обратного знака с той стороны, в которую направлена горизонтальная проекция вектора намагниченности;

- обнаружение локальных объектов, глубина верхней или нижней кромок которых значительно отличается от заданных для всего слоя: в этом случае объект на результирующей карте не будет иметь контрастных границ (если глубина его залегания будет больше заданной), либо будет обрамляться аномальной зоной с обратным знаком намагниченности или плотности (если глубина залегания объекта меньше заданной).

Эффективность перехода от магнитного поля к модели распределения эффективной намагниченности проиллюстрирована на рис. 2, где показан один из участков в пределах Московской синеклизы. На нем видно, как результаты моделирования в программе REIST помогают подчеркнуть содержащуюся в аномальном поле геологическую информацию, выявить важные структурные детали.



На третьем этапе интерпретации проводится комплексная классификация карт плотности и намагниченности пород кристаллического фундамента, построенных на предшествующем этапе с помощью программы REIST. Для этого применяется программа CLASS2 из пакета SIGMA-3D, осуществляющая интерактивное разделение двумерной гистограммы сочетаний плотность/намагниченность на статистически однородные петрофизические комплексы (ПК) [3]. Однородность комплексов определяется частными кластерами сочетаний двух этих параметров, при этом на дисплее немедленно визуализируются и окрашиваются в условные цвета те части карты, которые попадают в данный класс. После выделения класса программа вычисляет статистические характеристики каждого из параметров. В итоге интерпретируемый участок интерактивно разделяется на совокупность статистически однородных ПК.

На рис. 3 представлены результаты классификации эффективных плотности и намагниченности пород в Карелии, на одном из участков геотраверса 1-ЕВ. Этот участок находится в достаточно хорошо обнаженном районе и по своей геологической и петрофизической изученности может считаться эталонным. На рис 3 а и б показаны исходные аномальные поля  $\Delta g$  и  $\Delta T$ , а на рис 3 в и г – карты эффективных плотности и намагниченности, полученные в результате автоматического моделирования исходных полей программой REIST. Модифицированная двумерная гистограмма распределения эффективных плотности и намагниченности с границами интерактивно выделенных в программе CLASS2 классов показана на рис. 3 ж, а на рис. 3 з выделенные классы отмечены различными цветами в

соответствии с их предполагаемыми петрофизическими соответствиями, что в итоге фактически представляет собой легенду к карте классификации. Пространственное распределение выделенных классов показано на рис 3 д. Подчеркнем, что все приведенные рисунки формируются самой программой CLASS2. Сопоставление результатов двухпараметровой классификации с геологической картой участка, представленной на рис. 3 е, показывает, что рассматриваемые технологии дали здесь вполне адекватные результаты.

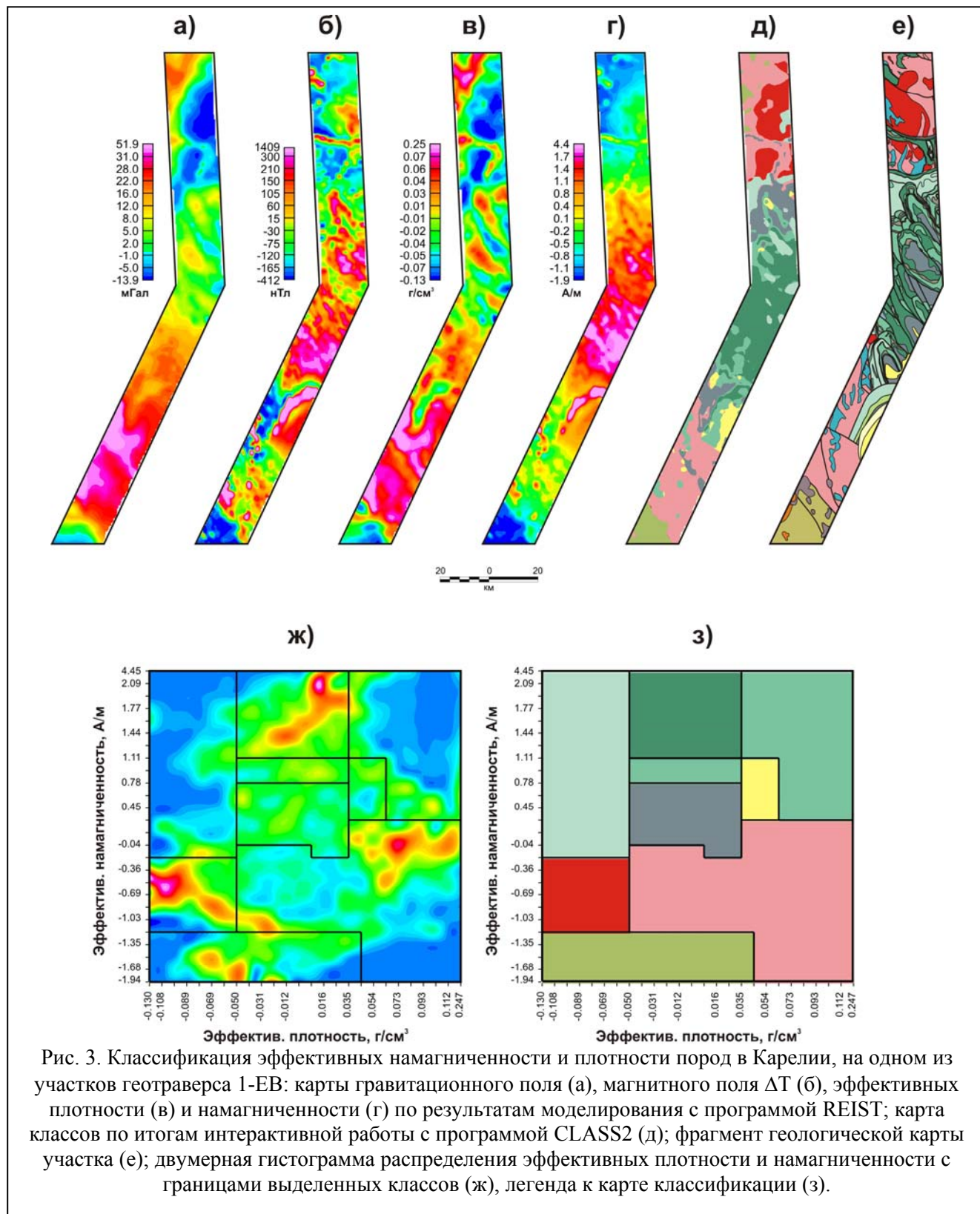


Рис. 3. Классификация эффективных намагниченности и плотности пород в Карелии, на одном из участков геотраверса 1-ЕВ: карты гравитационного поля (а), магнитного поля  $\Delta T$  (б), эффективных плотности (в) и намагниченности (г) по результатам моделирования с программой REIST; карта классов по итогам интерактивной работы с программой CLASS2 (д); фрагмент геологической карты участка (е); двумерная гистограмма распределения эффективных плотности и намагниченности с границами выделенных классов (ж), легенда к карте классификации (з).

Внутренняя структура выделенных ПК устанавливаются с помощью фильтрации матриц распределения плотностей и намагниченностей методом главных компонент с использованием программы MGK. Локальные компоненты петрофизических моделей маркируют пространственное расположение петрографически различных горных пород внутри статистически единого ПК. На этих картах выделяются аномалии типа «ступени», линейные аномалии, сопровождающие дайки, простирания пластов, зоны их изменений вдоль разломов, зоны нарушения корреляции и смены их характерных особенностей, часто совпадающие со сдвигами. Эта технология позволяет расшифровать внутреннее строение ПК, выделить складчатые и разрывные структуры, мелкие магматические тела и зоны изменения пород, насытить геологические карты конкретной структурной информацией и перейти к выделению структурно-вещественных комплексов (СВК), характеризующихся не только устойчивыми петрофизическими свойствами, но и характерными для них сочетаниями складчатых, разрывных и магматических структур.

Одним из направлений в изучении фундамента, для которого особо полезно располагать картами главных компонент эффективных физических свойств и разностей между значениями соответствующих свойств и этими компонентами, является картирование зон тектонической активизации. Распознавание тектонических нарушений, их контролирующих, включает несколько этапов. Первый этап заключается в раздельном изучении каждой из полученных компонент и построении схемы тектонических нарушений. Оценив качество материалов на карте, интерпретатор выделяет все достоверные аномалии интересующих типов. Второй этап распознавания заключается в синтезе результатов морфологического анализа каждой из полученных карт и построении сводных схем тектонических нарушений независимо по данным магниторазведки и гравиразведки. На этом этапе выясняется устойчивость выделения того или иного нарушения. Наиболее достоверным считается нарушение, если оно независимо обнаружено на картах различных компонент. Наконец, третий, итоговый этап заключается в синтезе результатов, полученных по данным магниторазведки и гравиразведки, другими словами, в комплексном синтезе. На этом этапе осуществляется построение итоговой схемы, причем интерпретатор имеет возможность оценить достоверность выделения тектонических нарушений на предыдущих этапах.

На рис. 4 проиллюстрированы результаты применения этой технологии на одном из участков в пределах Московской синеклизы. На рис. 4 а и б показаны одни и те же линии вероятных тектонических нарушений, причем черным цветом – распознанные по картам различных компонент эффективной намагниченности, а белым цветом – по картам эффективной плотности. Большинство линий, обнаруженных первоначально на картах намагниченности, уверенно прослеживается на картах плотности и наоборот. Вместе с тем, существуют нарушения, которые обнаруживаются только по данным одного из методов. В целом же, сравнивая данные рисунки, можно сделать вывод о том, что подобное картирование является достаточно устойчивым, а эффективность обнаружения тектонических нарушений в фундаменте – весьма высокой. Следует, естественно, отметить, что в этом примере исходные данные магниторазведки являются более крупномасштабными, поэтому количество линий, первоначально проведенных по ним, существенно больше.

Последним этапом геофизической интерпретации является определение объемного распределения эффективных параметров по программе DVOP, позволяющей установить пространственные соотношения между СВК. Здесь могут быть реализованы как аппроксимационный, так и фильтрационный подходы, с помощью которых строятся трехмерные модели распределения физических свойств горных пород [3]. Эти модели можно динамически визуализировать по произвольной сети разрезов и по горизонтальным срезам. Технология позволяет выявить наклонные контакты ПК, сопровождающие надвиги, вертикальные их контакты, связанные со сдвигами, откартировать тектонические аллохтоны, установить погребенные гранитные интрузии и иные структуры. Как правило, направления наклона контактов между СВК подтверждаются результатами сейсморазведки МОГТ.



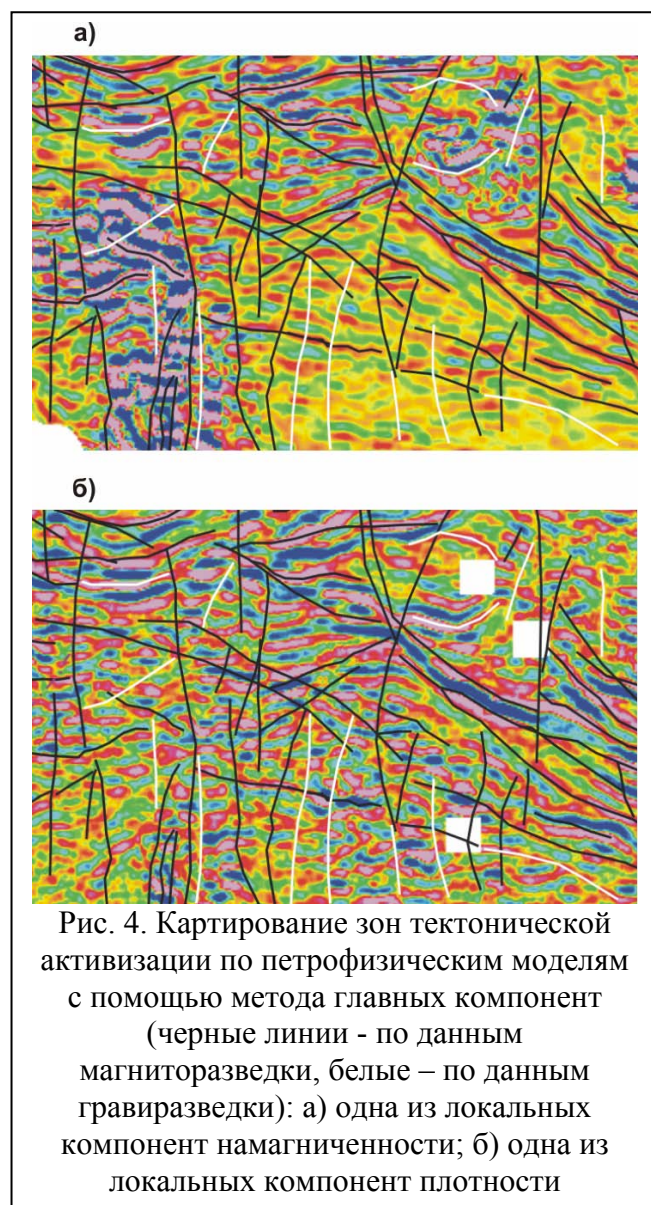
На завершающем этапе осуществляется геологическая интерпретация полученных материалов, и карты ПК трансформируются в карты структурно-вещественных комплексов (СВК) путем корреляции с данными глубоких скважин, вскрывающих фундамент, и геологическими данными по прилегающим обнаженным или хорошо разбуренным районам, позволяющим судить о реальном петрографическом составе, степени метаморфизма и абсолютном возрасте выделенных СВК. Геологический анализ карт классификации ПК показывает, что в отдельных случаях одному СВК могут отвечать два или три класса ПК или же один ПК может объединять различные СВК с близкими петрографическими свойствами. В таких случаях по классификационной диаграмме производится дополнительное разделение такого класса на два или более или же объединение соседствующих классов воедино, контролируемое повторной визуализацией новых СВК на карте.

Особенно много данных для расшифровки внутренней структуры СВК дают карты локальных компонент эффективной намагниченности. Они позволяют установить направления простирания горных пород в СВК, крупные складчатые дислокации, выделить округлые гранито-гнейсовые и мигматитовые купола по кольцевым или овальным системам аномалий, крупные массивы гранитоидов по широким «бесструктурным» ареалам, установить тектонические несогласия между различными СВК или же секущий характер контактов магматических пород.

Описанная методология была применена, в частности, при составлении геологических карт докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы различных масштабов. В качестве примера на рис. 5 демонстрируется составленная нами карта СВК докембрийского фундамента листа N-37 (Москва) в сопоставлении с картой фундамента, иллюстрирующей изданную в 1999 г. «Объяснительную записку к Государственной геологической карте масштаба 1:1 000 000».

Архейские структуры Волго-Уральского свода, расположенного на востоке данной территории, удалось расчленить на гранулит-базитовый СВК отрадненской серии и СВК «кислых» гранулитов большечеремшанской серии. Выявлены системы тектонических покровов, обусловленных надвиганием структур архея на раннепротерозойские структуры Торопец-Сердобского пояса. В северо-восточной части территории располагается Московский блок кислых гранулитов, принадлежащий к структурам раннепротерозойского Московско-Мезенского пояса. Здесь установлены раннепротерозойские интрузии базитов, а также зоны гранитизации и мигматизации пород.

Центральную часть территории занимает Торопец-Сердобский пояс, представляющий собой зону коллизии между Волго-Уральским и Сарматским архейскими протоконтинентами.



Удалось впервые установить его внутреннюю структуру под мощными осадочными накоплениями Пачелмского авлакогена. Она обусловлена наклоненными к северо-востоку крупными тектоническими пластинами, разделенными поверхностями надвигов. Южную пластину образуют зеленокаменно-сланцевые толщи Калужской зоны, представляющие собой аккреционную призму. Вторая тектоническая пластина представлена Пересыпкинским гранулитовым блоком, маркирующим зону раннепротерозойской субдукции. Третью, Серпуховскую зону Торопец-Сердобского пояса образуют зеленокаменные вулканогенно-терригенные толщи позднеархейско(?)–раннепротерозойского возраста, метаморфизованные в амфиболитовой фации и образующие веерную складчато-покровную систему. Эти образования близки по характеру к надсубдукционным палеоостроводужным образованиям. На юго-востоке структуры Серпуховской зоны и Пересыпкинского блока интенсивно мигматизированы вдоль постколлизиионных левосторонних сдвигов северо-западного простираня.

Торопец-Сердобский пояс в целом шарьирован на юго-запад и резко несогласно срезает погружающиеся под него структуры Сарматского архейского протоконтинента на северном краю Воронежского массива. В пределы листа N-37 попадает восточная часть раннепротерозойского Курского железорудного пояса, где обособляются архейские образования: мигматит-гнейсовая обоянская серия и метавулканическая зеленокаменная михайловская серия, а также нижнепротерозойские толщи курской железорудной и оскольской серий. Установлена сложная S-образная надвигово-сдвиговая структура Курского пояса, выявлены многочисленные гнейсовые купола и интрузии позднеархейского салтыковского гранитоидного комплекса. Далее к востоку лежит Липецко-Лосевский вулканический пояс, маркирующий собой раннепротерозойскую активную окраину протоконтинента. В нем выявлены выходы архейского субстрата обоянской серии, раннепротерозойские гнейсовые купола и интрузии основных и кислых магматитов. Самое восточное положение занимает Воронцовская зона, сложенная нижнепротерозойскими метатерригенными осадками с базитовыми и кислыми интрузиями и отделенная от Лосевской зоны Ливенским швом, представлявшим палеозону субдукции.

Полученные на основании интерпретации аэрогеофизических данных карты в свою очередь могут являться основой для дальнейшего прослеживания выделенных комплексов на

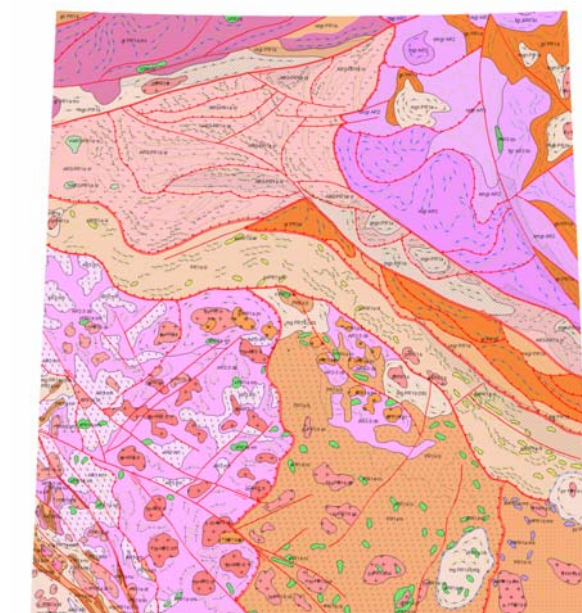
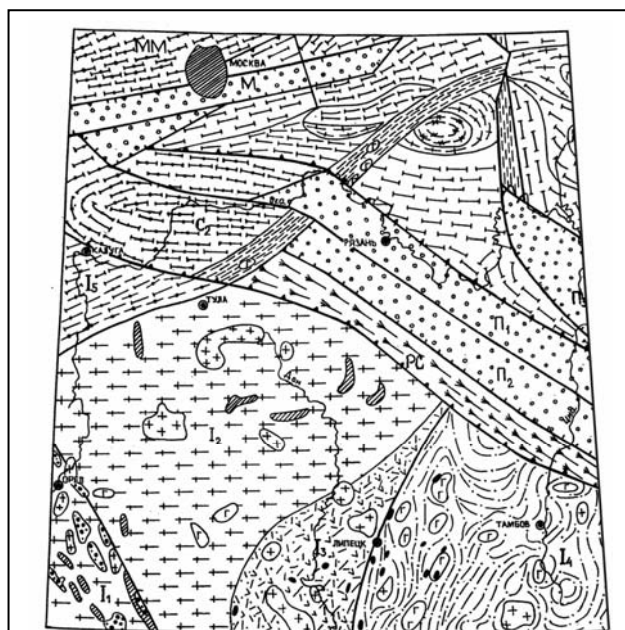


Рис. 5. Геологическая карта довендских образований (по Б.В. Петрову, 1999 г.) и геологическая карта СВК докембрийского метаморфического фундамента, построенная по результатам интерпретации с помощью описанной технологии (внизу)

глубину по данным ГСЗ, в результате чего строятся трехмерные модели глубинного строения земной коры.

Таким образом, интерпретация данных современных аэрогеофизических съемок позволяет получать новые данные о строении кристаллического фундамента. Построенные петрофизические модели фундамента могут служить современной основой для региональных геологических исследований и минерагенических прогнозов. Вычитая же поля моделей из наблюдаемых полей, можно получать остаточные аномалии, которые оказываются связанными с геологическими образованиями в верхней части разреза изучаемых площадей и являются перспективными на поиски полезных ископаемых. Рассмотрению этих вопросов посвящены специальные статьи в этом журнале.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // Геофизика. 2003. № 4. с. 37-40.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // Геофизика. 2003. № 6. с. 55-58.
3. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сессии международного семинара им. Д.Г.Успенского. М: ОИФЗ РАН. 2004. с. 11.
4. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Возможности структурно-вещественного картирования по данным магниторазведки и гравиразведки в пакете программ СИГМА-3D // Геофизический вестник. 2004. № 3 с. 11-15.