

расчленив их на соответствующие фазы. Для подавляющего большинства выделенных фаз впервые дана комплексная петрохимическая характеристика. Геохимические особенности рудного района связаны с глубинными процессами внутриплитного магматизма, в результате которых были сформированы гранитоидные магматические породы, осложненные глубинными разломами, контролирующими серебро-ртутную минерализацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов, Г.С. Перспективы промышленной флюоритоносности Памира // Доклады АН Тадж. ССР / Г.С. Аверьянов, Ф.Ш. Искандаров. — 1985. — Т. 28. — № 9. — С. 528–531.
2. Аверьянов, Г.С. Геология оловорудных районов и месторождений Памирской оловоносной области // Геология оловорудных районов и месторождений Памирской оловоносной области / Г.С. Аверьянов, А.Б. Павловский. — М.: Наука, 1986. — С. 103–110.
3. Афиногенова, Л.Н. Основные черты эндогенной металлогении Южного Памира / Л.Н. Афиногенова. — Душанбе: Дониш, 1979. — 133 с.
4. Борисенко, А.С. Серебро-сурьмяная рудная формация / А.С. Борисенко, Г.Г. Павлова, А.А. Оболенский. — Новосибирск: Наука, 1992. — 188 с.
5. Буданов, В.И. Основные черты истории развития магматизма Памира. В кн.: Материалы по геологии Памира, Вып. 2 / В.И. Буданов. — Душанбе, 1964. — С. 174–194.
6. Владимиров, А.Г. Позднемезозойский магматизм Южного Памира // Гранитоидный магматизм и оруденение Базардаринского горно-рудного района (ЮВ Памир) / А.Г. Владимиров, Р.Т. Беляева, В.А. Пономарчук. — Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР. — 1990. — 19 с.
7. Ефремова, С.В. Петрохимические методы исследования горных пород. Справочное пособие / С.В. Ефремова, К.Г. Стафеев. — М.: Недра, 1985. — 511 с.

8. Заварицкий, А.Н. Изверженные горные породы / А.Н. Заварицкий. — М.: Изд. АН СССР, 1961. — 479 с.
9. Литвиненко, А.К. Геология Черногорского месторождения ювелирного скаполита на Центральном Памире (Таджикистан) / Геология рудных месторождений / А.К. Литвиненко, С.Б. Моисеева, Ш.А. Одинаев, В.А. Утенков. — Т. 61. — № 5. — М.: Наука, 2019. — С. 96–108.
10. Магматические горные породы. Классификация, номенклатура, петрография. Ч. 1. — М.: Наука, 1983. — 366 с.
11. Павлова, Г.Г. Минеральный состав и стадийность формирования серебро-сурьмяного оруденения Ақджилгинского рудного поля (ЮВ Памир) // Гранитоидный магматизм и оруденение Базардаринского горно-рудного района (ЮВ Памир) / Г.Г. Павлова, Н.К. Морцев, А.С. Борисенко и др. — Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1990. — С. 124–159.
12. Шило, Н.А. В сб.: Проблемы геохимии эндогенных процессов / Н.А. Шило. — Новосибирск: Наука, 1977. — 110 с.
13. Borisenko, A.S. Silver deposits of the Pamir — region, Tajikistan: metallogeny, mineralogy and genesis // International Geology Review / A.S. Borisenko, G.G. Pavlova, A.A. Borovikov et al. — 2000. — V.42 (8). — P. 702–723.
14. Le Bas, M.J. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram // J. Petrology / M.J. Le Bas, R.W. Le Maotre, A. Streckeisen, B. Zanettin. — 1986. — V. 27. — P. 745–750.
15. Peccerillo, A. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contrib. Mineral. Petrol / A. Peccerillo, S.R. Taylor. — 1976. — V. 58. — № 1. — P. 63–81.
16. Vladimirov, A.G., Borisenko A.S., Rudnev S.N. et al. Ore-bearing granite plutons of the Southern Pamir, Tajikistan // Kremenetsky A., Lehmann B., Seltmann R. (eds.) Ore-bearing granites of Russia and adjacent countries. — Moscow: IMGRE Press, 2000. — P. 331–348.

© Асматов И.Х., Ошурмамадов А.К., Одинаев Ш.А., 2020

Асматов Ихтиёр Хабибулоевич // ikhtiyor.asmatov.91@mail.ru
Ошурмамадов Алишер Киргизович // vulcanite@bk.ru
Одинаев Шарифджон Ахтамжонович // sharif.geolog@mail.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.839 + 550.8.05

Бабаянц П.С., Контарович О.Р., Трусов А.А. (АО «ГНПП «Аэрогеофизика»)

СОВРЕМЕННЫЕ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОГНОЗЕ, ПОИСКАХ И ОЦЕНКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обсуждается роль современных аэрогеофизических технологий при выполнении современных прогнозно-поисковых работ. Рассмотрены современные модификации аэрогеофизических методов и направления их развития, особенности использования аэрогеофизических технологий на разных стадиях прогнозно-поисковых работ. Проанализированы современные подходы к геофизическому моделированию и комплексной интерпретации данных. **Ключевые слова:** современные аэрогеофизические технологии; прогноз, поиски и оценка; моделирование; комплексная интерпретация.

Babayants P.S., Kontarovich O.R., Trusov A.A. (Aerogeophisica) MODERN AIRBORNE GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES FOR FORECASTING, PROSPECTING AND EVALUATION OF DEPOSITS OF SOLID MINERALS

*The role of modern airborne geophysical technologies in forecasting and searching for deposits is discussed. Modern modifications of airborne geophysical methods and their development prospects are considered, as well as features of using airborne geophysical technologies at different stages of geological prospecting. Modern approaches to geophysical modeling and complex data interpretation are analyzed. **Keywords:** modern airborne geophysical technologies; forecast, search and evaluation; modeling; complex interpretation.*

Введение

Использование аэрогеофизических методов и технологий прочно вошло в практику геологоразведочных работ практически сразу, как только первые опыты измерения физических полей Земли с борта летательного аппарата дали положительный результат — с середины прошлого века. Конечно результаты таких

съемок существенно уступали наземным аналогам как в точности, так и в пространственном разрешении. До определенного момента считалось, что аэросъемки отвечают по кондициям аналогичным наземным, выполненным на масштаб мельче, т.е. аэросъемка масштаба, например, 1:25 000 приближается по качеству и разрешению к наземной съемке масштаба 1:50 000. Кроме того, значительная погрешность привязки аэрогеофизических данных требовала обязательной наземной проверки полученных результатов. Однако эти недостатки компенсировались высокой производительностью аэрогеофизических работ и относительно небольшой их удельной стоимостью. Таким образом, вплоть до последнего десятилетия прошлого века аэрогеофизические методы и технологии занимали скромную нишу работ, предвещающих широкий комплекс наземных геолого-геофизических исследований.

Ситуация начала радикально меняться примерно с середины 1990-х годов. Этому способствовало следующее:

1. Внедрение в практику геофизического приборостроения новой элементной базы, в т.ч. микропроцессорной техники, что позволило, в частности, осуществлять регистрацию и обработку сигналов в цифровой форме. Это дало возможность резко повысить помехозащищенность аппаратуры и радикально (в отдельных методах на 2÷3 порядка) увеличить ее чувствительность. Кроме этого, значительно понизилось энергопотребление используемой аппаратуры.

2. Широкое использование компьютерной техники при выполнении съемочных работ, в т.ч. на борту летательного аппарата, что позволило резко увеличить объемы обрабатываемой и регистрируемой информации и тем самым с одной стороны — существенно расширить набор методов, одновременно используемых на едином носителе, а с другой стороны — увеличить частоту опроса геофизической аппаратуры, тем самым повысив детальность съемки.

3. Ввод в эксплуатацию спутниковых навигационных систем, что более чем на порядок улучшило точность позиционирования точек наблюдений физических полей (до долей метра). Отметим, что использование спутниковой навигации позволяет определять все три координаты точек наблюдений (помимо долготы и широты еще и высоту над уровнем моря), что имеет принципиальное значение при использовании современных методов интерпретации физических полей.

Перечисленные факторы привели к тому, что к настоящему времени появилась возможность выполнения кондиционных аэрогеофизических съемок вплоть до масштаба 1:5 000, а с использованием легких авианосителей — и более детальных. Другими словами, аэрогеофизические методы успешно конкурируют сейчас с наземными аналогами по качеству и пространственному разрешению, а в стоимостном отношении существенно превосходят их. Достаточно сказать, что за месяц работы один оборудованный борт может выполнить до 15 000 пог. км аэрогеофизических съемок, которые при

этом не требуют предварительной подготовки специальной сети наблюдений на поверхности земли.

Указанные преимущества аэрогеофизических работ имеют решающее значение в современных экономических условиях, когда предоставляемые лицензии на геологоразведочные работы ограничиваются достаточно жесткими временными рамками. В этих случаях для оперативного и всестороннего обследования территории альтернативы аэрогеофизическим методам просто нет.

Современный комплекс аэрогеофизических методов

Аэромагнитная съемка — традиционно ведущий аэрогеофизический метод как по объемам выполняемых работ, так и по кругу решаемых геологических задач. Современные аэромагнитометры практически исключительно основаны на использовании квантовых цезиевых датчиков, характеризующихся чувствительностью 0.5÷1.0 пкТл при 10÷100 измерениях в секунду. Как правило, магнитометры имеют более одного измерительного канала, что открывает принципиальную возможность измерения градиента магнитного поля. Датчики магнитометра жестко крепятся в специальном стингере на борту летательного аппарата или размещаются в выпускной gondole. В последнем случае там же размещается дополнительная антенна навигационного приемника для регистрации координат точек измерения магнитного поля.

Технические характеристики используемых в настоящее время магнитометров избыточны и заметно превосходят возможности современных технологий обработки и интерпретации данных. Этот фактор в основном и определяет современные тренды развития аэромагнитной съемки, связанные в первую очередь с разработками систем измерений градиентов магнитного поля как с использованием жесткого крепления, так и на подвесе, включая системы измерения полного тензора магнитного поля [15].

Еще одной важной тенденцией является расширение спектра носителей в первую очередь за счет использования легких летательных аппаратов (рис. 1), включая беспилотные. Эта тенденция послужила импульсом для разработки облегченных датчиков магнитного поля как квантовых, так и основанных на других принципах измерения (микромеханические [13], феррозондовые с повышенной чувствительностью [https://stefan-mayer.com/images/datasheets/Data-sheet_Fluxmaster.pdf]).

Структура аномального магнитного поля зависит главным образом от состава и формы нахождения в породе ферромагнитных минералов и определяется в первую очередь вещественным составом пород. По магнитным свойствам дифференцированы и осадочные, и метаморфические породы, а для магматических — величина магнитной восприимчивости обычно увеличивается с повышением основности [10] (рис. 2). В то же время определение вещественного состава пород на основании анализа только магнитного поля неоднозначно, т.к. абсолютно разные по составу комплексы могут обладать весьма близкими магнитными



Рис. 1. Легкий самолет СП-30, оборудованный для аэромагнитной съемки. Два датчика магнитометра расположены на концах крыльев. Справа — тот же самолет в сложенном виде для транспортировки в прицепе к легковому автомобилю

характеристиками. Отсюда для повышения достоверности идентификации вытекает необходимость привлечения дополнительного параметра, величина которого также зависит от вещественного состава образований. К числу таких параметров в первую очередь можно отнести плотность горных пород, для которой отмечена та же закономерность (увеличение плотности с повышением основности магматических пород, рис. 2.).

Таким образом, значение гравиметрии как метода, основанного на изучении распределения плотности в разрезе горных пород, трудно переоценить, но, к сожалению, выполнение традиционных гравиметрических съемок необходимой детальности требует значительных материальных и временных затрат. Однако для целей прогнозно-поисковых работ во многих случаях ее с эффективностью может заменить аэрогравиметрия.

Аэрогравиметрия — один из наиболее динамично развивающихся в последнее время аэрогеофизических методов. К настоящему времени создана аппаратура и разработана методика проведения аэрогравиметриче-

ских измерений компенсационными гравиметрами с погрешностью до $0.2 \div 0.4$ мГал (с использованием в качестве носителя самолета), что удовлетворяет требованиям к гравиметрическим съемкам масштаба 1:50 000 для труднодоступных территорий. Вертолетные съемки характеризуются еще более высокой точностью измерений за счет меньшей скорости полета. При этом по пространственному разрешению аэрогравиметрические съемки, выполненные с борта самолета, удовлетворяют масштабу 1:100 000. Аэрогравиметрическая аппаратура, разрабатываемая в нашей стране и за рубежом, имеет весьма близкие характеристики.

В настоящее время в эксплуатацию вводятся бесплатформенные гравиметры [1], весьма перспективным представляется использование измерений компонент градиента силы тяжести. Сейчас такими технологиями владеет лишь пара зарубежных компаний [12, 14], однако разработка аппаратуры для измерений компонент градиента силы тяжести ведется и в России (ВНИИФТРИ).

Гравитационная градиентометрия характеризуется заметно более высоким пространственным разрешением и точностью измерений (в сопоставимых значениях), однако уступает в глубинности традиционной гравиметрии. Наши западные коллеги нашли выход из положения, совмещая на одном носителе измерение поля и компонент его градиента (рис. 3).

Аэроэлектроразведка традиционно характеризуется наибольшим многообразием методов и модификаций, которые в принципе могут использоваться для решения геологических задач. Однако львиная доля аэроэлектроразведочных работ, выполняемых в мире, делится в последние годы между методом частотной аэроэлектроразведки в модификации дипольного индуктивного профилирования (ДИП, в западной транскрипции EM) и методом, основанным на изучении нестационарных полей (аналог метода переходных процессов).

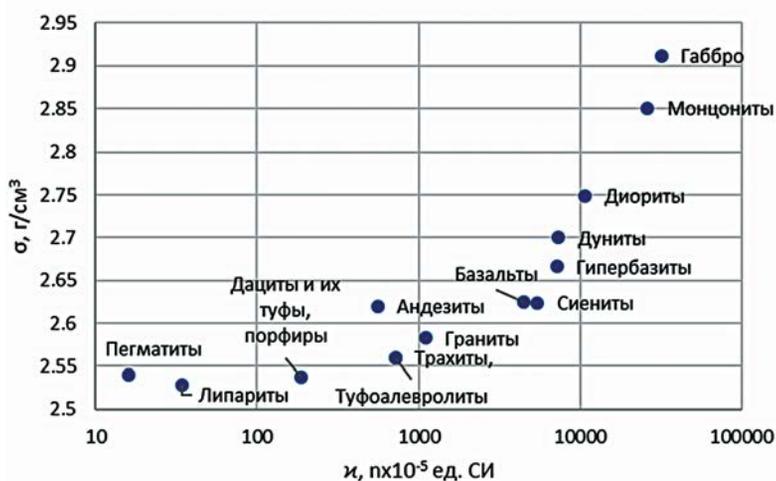


Рис. 2. Пример диаграммы средних значений магнитной восприимчивости и плотности магматических пород

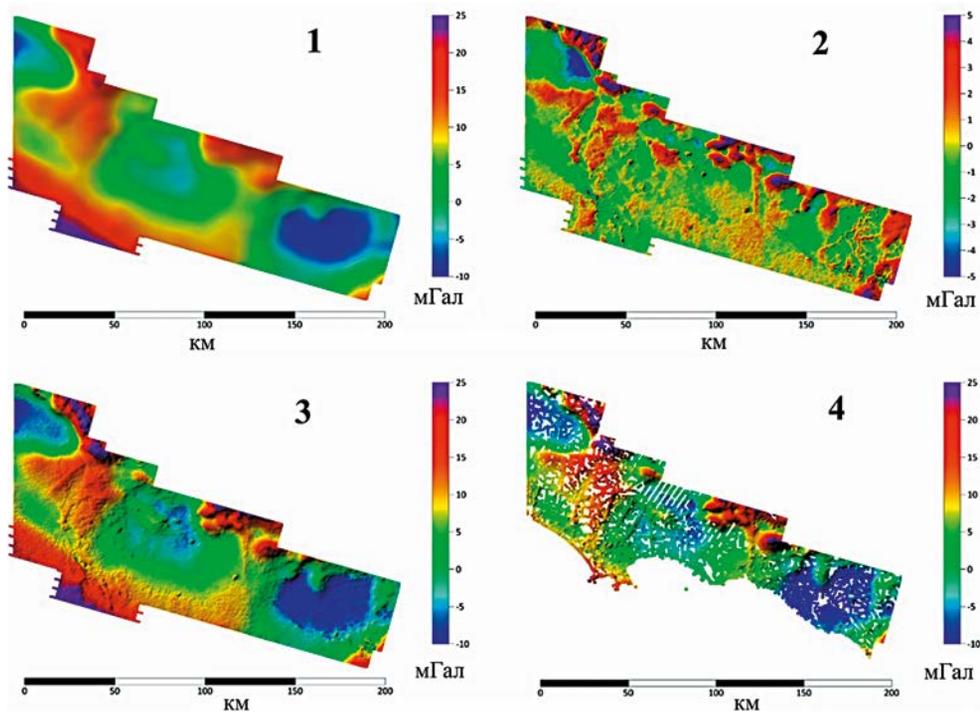


Рис. 3. Сопоставление результатов аэро- и наземной гравиметрической съемки (по материалам компании CGG, полученным с системой FALCON): 1—3 — данные аэросъемки: 1 — гравиметрия; 2 — градиентометрия; 3 — гравиметрия плюс градиентометрия; 4 — наземная съемка

Современная российская аппаратура для частотной электроразведки превосходит лучшие западные аналоги по чувствительности и разрешающей способности. Основой используемого в настоящее время комплекса EM-4H (рис. 4) является частотная аэроэлектроразведочная система (модификация метода дипольного индуктивного профилирования), совмещающая простоту и эффективность измерений с их высокой разрешающей способностью и большой эффективной глубиной. Петля генераторного диполя устанавливается на летательном аппарате (самолет Ан-2 или Ан-3, вертолет Ми-8), а приемник буксируется за ним в гондоле. В настоящее время завершены работы по созданию новой модификации аппаратуры с буксируемой на подвеске генераторной петлей, что позволяет использовать для работы более широкий спектр летательных аппаратов, включая легкие вертолеты.

Считается, что аэроэлектроразведка методом переходных процессов (АМПП, или Time Domain)

этом является возможность определения не только проводимостей (сопротивлений) образований верхней части разреза, но и их поляризуемости. Это крайне актуально при поисках месторождений, сопровождающихся сульфидной минерализацией.

В последние годы широко рекламируется модификация аэроэлектроразведки, основанная на изме-

является на сегодняшний день наиболее эффективной технологией прямых поисков твердых полезных ископаемых на этапе детальных поисково-оценочных работ. При этом метод эффективен при сопротивлении поисковых объектов до первых десятков Ом·м, в этом случае глубинность метода может достигать сотен метров. При высоких же сопротивлениях разрешающая способность метода значительно хуже, т.е. его картировочные возможности невелики. В какой-то мере это компенсируется одновременным использованием режимов on-time и off-time (регистрация характеристик насыщения и спада вихревого поля соответственно), однако нельзя сказать, что проблема полностью решена. Важным преимуществом метода при



Рис. 4. Электроразведочный комплекс EM-4H (слева) и Time Domain (справа) на вертолете Ми-8

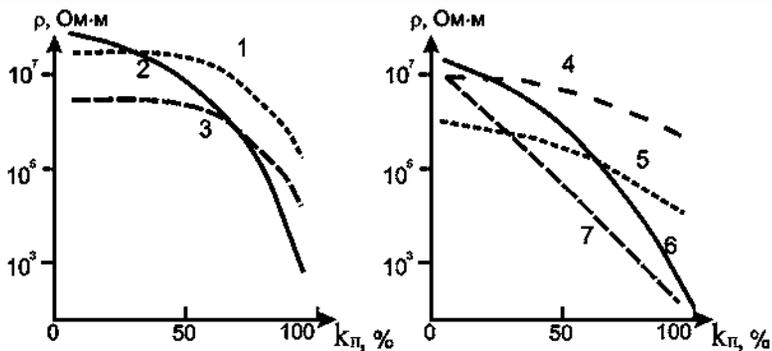


Рис. 5. Зависимости удельного электрического сопротивления интрузивных и эффузивных пород от коэффициента водонасыщения (по Н.Б. Дортман): 1 — перидотит с пористостью $k_p = 1,4\%$; 2 — гранит, $k_p = 2,8\%$; 3 — габбро, $k_p = 2,8\%$; 4 — диабаз, $k_p = 2,7\%$; 5 — порфирит, $k_p = 2,7\%$; 6 — кварцевый порфир, $k_p = 3,2\%$; 7 — базальт $k_p = 4\%$

рении естественных электромагнитных полей Земли, обусловленных процессами в атмосфере и ионосфере (технологии ЗТЕМ и ММТ [7, 8]). Эти технологии не требуют использования специальных дорогостоящих источников электромагнитного поля, обеспечивая при этом большую глубинность исследований (до 1,5 км). Однако, на наш взгляд, они не обеспечивают пространственного разрешения, достаточного для решения задач поисков и оценки месторождений и могут быть рекомендованы для использования главным образом на стадии регионального прогноза оруденения.

Электрические свойства пород безусловно зависят от их вещественного состава, но в гораздо большей степени определяются объемным соотношением различных фаз, составляющих породу и обладающих различной электропроводностью (рис. 5). Таким образом, электрические свойства образований определяются в первую очередь характером и степенью проявления наложенных процессов как гипергенных, так и глубинных (метаморфизм, метасоматоз, обводненность, дробление и т.п.).

Развитие методов аэроэлектроразведки идет в направлении снижения базовой частоты, увеличения длительности импульса (для АМПП) и совершенствования технологий вычисления эффективных геоэлектрических характеристик разреза, в т.ч. с использованием методов 3D-моделирования электромагнитного поля.

Аэрогамма-спектрометрия, пожалуй, самый консервативный из аэрогеофизических методов с точки зрения развития технологий регистрации компонент поля радиоактивности. За прошедшие годы основные достижения метода сводятся к разработке технологии цифровой регистрации полного спектра гамма-излучения в заданном диапазоне и альтернативных способов стабилизации шкалы спектрометра.

В современных аэрогамма-спектрометрах используются сцинтилляционные детекторы гамма-излучения общим объемом до 48 л, характеризующиеся высокой разрешающей способностью (не хуже 8 % по линии 662 кэВ). Современные авиационные спектрометры позволяют осуществлять ежесекундную циф-

ровую регистрацию полного спектра гамма-излучения в диапазоне 0.3÷3.5 мэВ, распределенного в 256 или 512 (1024) каналов. Это дает возможность, помимо традиционного для гамма-спектрометрии определения концентрации естественных радионуклидов (урана, калия и тория) в приповерхностном слое, получать оценку распределения свободного радона в атмосфере, а также определять характер, степень и изотопный состав техногенного загрязнения территории, если такое имело место.

Важнейшей особенностью аэрогамма-спектрометрии является крайне малая длина свободного пробега гамма-квантов в веществе, из чего следует, что метод практически не обладает глубинностью. Отсюда вытекает

главная проблема содержательного использования его результатов, связанная с высокой ландшафтной обусловленностью и возможным экранированием поля радиоактивности даже маломощным чехлом рыхлых отложений (включая почвенный слой). В целом общая радиоактивность горных пород определяется содержаниями естественных радионуклидов (калия, тория и урана), связанных с их составом и генезисом. Для магматических горных пород в основном наблюдается увеличение радиоактивности с уменьшением основности. Аэрогамма-спектрометрия характеризует распределение и соотношения естественных радионуклидов и фактически эквивалентна геохимии по трем специфическим элементам. При корректном подавлении влияния ландшафтного фактора соотношение концентраций естественных радионуклидов позволяет определить радиогеохимическую специализацию горных пород, которая часто бывает связана с наложенными процессами (гидротермальные изменения, метасоматоз).

Критерии выбора оптимального комплекса аэрогеофизических методов

Выбор комплекса аэрогеофизических методов применительно к решению конкретной геологической задачи в заданных геолого-геофизических условиях должен осуществляться с учетом целого ряда факторов, к числу главных из которых относятся следующие.

1. Все чаще в последние годы поисковый интерес представляют объекты, характеризующиеся низкими содержаниями полезной компоненты, малоконтрастные по физическим свойствам и, как следствие, слабо проявленные в геофизических полях. В этих условиях устоявшийся подход, связанный с выявлением и заверкой геофизических аномалий, отвечающих целевому объекту, оказывается малоэффективным, и на первый план выходит стратегия последовательного картирования косвенных критериев локализации оруденения.

2. Разные аэрогеофизические методы основаны на измерении и оценке разных параметров среды и, как следствие, ориентированы на выявление неоднородностей, обусловленных влиянием различных факторов: вещественного состава, гипергенных изменений, наложенных процессов и т.п.

3. Затраты на выполнение аэрогеофизических съемок более чем на половину состоят из затрат на авиационное обеспечение работ, отсюда дополнение аэрогеофизического комплекса еще одним методом весьма незначительно (на 10±20 %) увеличивает общую стоимость исследований.

Из изложенного с очевидностью следует целесообразность при прочих равных условиях использования максимально полного комплекса методов, что при весьма незначительном удорожании работ позволит получить максимально полную характеристику объекта изучения. При этом необходимо учитывать возможный технологический конфликт некоторых аэрогеофизических технологий, а также ситуацию, когда целевой объект находит четкое отражение в конкретных геофизических полях (например, хорошо проводящие руды — в электромагнитном поле). В этом случае индикаторный метод используется как основной, и методика съемки выбирается с учетом именно его требований для обеспечения максимально кондиционных данных. Остальные методы тогда должны рассматриваться как вспомогательные с определенными допусками по элементам методики (высота наблюдений, частота измерений и т.п.).

При выборе наиболее эффективной модификации аэроэлектроразведки необходимо учитывать следующее.

1. Глубинность частотной электроразведки ДИП составляет около 150 м, АМПП — до 500 м (в благоприятных условиях).

2. АМПП обладает неудовлетворительной разрешающей способностью при сопротивлениях разреза свыше 100–200 Ом·м.

3. С помощью АМПП помимо сопротивлений можно определять поляризуемость образований.

4. Стоимость съемки с АМПП в 2–3 раза превышает стоимость съемки с частотными модификациями электроразведки.

Таким образом, электроразведка АМПП будет эффективной при поисках массивных сульфидных (например, колчеданных) руд, комплексных месторождений (например, медно-порфириновых с эпитермальным золотом), объектов, связанных с сульфидной минерализацией. Если предметом локализации являются зоны наложенных изменений, структурно-вещественные комплексы определенной генерации и т.п., предпочтительнее использование более дешевой частотной модификации. Также ей следует отдать предпочтение в случае, когда эффект от применения обоих модификаций ожидается примерно одинаковым.

Важным вопросом является выбор масштаба съемки (расстояния между рядовыми маршрутами). Понятно, что заказчик работ — недропользователь заинтересован в максимальном их удешевлении и поэтому часто настаивает на разрежении сети, пусть даже и не всегда оправданном. Однако при определении сети наблюдений необходимо исходить не только из поставленных геологических задач, но и учитывать необходимость последующей обработки и интерпретации

данных. Широкое использование при этом вероятностно-статистических методов (в т.ч. в скользящих окнах) неизбежно приводит к некоторому ухудшению разрешающей способности результатов по отношению к исходному масштабу съемки. Отсюда масштаб съемки должен выбираться на одну, а то и две ступени крупнее по отношению к масштабу отчетных интерпретационных материалов.

Роль аэрогеофизических исследований на разных этапах прогнозно-поисковых работ

Как уже отмечалось, современные аэрогеофизические технологии могут с успехом использоваться практически на всех стадиях геологоразведочного производства. Комплекс аэрогеофизических методов весьма представительен как по набору используемых методов, так и по перечню параметров геологического разреза, которые могут быть изучены с борта летательного аппарата. Сочетание перечисленных методов в различных комбинациях позволяет сформировать технологические комплексы для решения широчайшего круга геологических задач, при этом технические ограничения, препятствующие совместному использованию различных методов, как правило, не носят принципиального характера. Одним из важнейших качеств аэрогеофизических съемок является их экспрессность, обусловленная высокой производительностью работ, что позволяет в обозримые сроки выполнять детальное обследование значительных по размерам площадей.

Указанные особенности, объемный характер получаемой информации за счет разновысотности пунктов наблюдений физической полей, а также высокое качество получаемых материалов, не уступающее качеству аналогичных наземных съемок, позволяет сформулировать базовый методологический принцип их применения. Это — детальные (масштаба 1:50 000 и крупнее) комплексные работы на опережающих этапах геологического изучения территорий с целью создания высококачественной многоцелевой геофизической основы решения широкого круга геологических задач.

При региональных исследованиях (обычно сопровождающих работы по созданию Государственной геологической карты масштаба 1:200 000 — ГК-200, либо по геолого-минералогическому картированию — ГК-200 и ГК-50) предметом изучения являются объекты ранга рудных узлов и рудных полей. При мелкомасштабных работах использование аналитических методов анализа, основанных на технологиях прямого моделирования геофизических методов, представляется малоэффективным, поскольку размеры элементов, определяющих факторы локализации отдельных месторождений, могут оказаться меньше пространственного разрешения съемки. В этом случае ключевая роль отводится методам вероятностно-статистического анализа.

Для установления закономерностей проявления тех или иных факторов при условии наличия статистически представительной выборки эталонных объектов можно использовать анализ совмещенных гистограмм распределения анализируемого параметра, постро-

енных отдельно для генеральной совокупности (матрица распределения параметра) и целевого объекта (значения параметра в точках размещения эталонов). Пример таких совмещенных гистограмм приводится на рис. 6. Как видно из рисунка, эталонные объекты тяготеют к областям с пониженными значениями параметра. Для наглядности области, где значения параметра с большей вероятностью отвечают наличию объекта, выделены розовой заливкой; области, где значения параметра с большей вероятностью отвечают отсутствию объекта, выделены голубой заливкой.

В приведенном примере в качестве эталонной выборки использовались точки размещения всех месторождений, рудопоявлений и точек минерализации изучаемого генетического типа, известные в контуре площади работ по ретроспективным данным. Такая информация содержится, например, в банках данных, которые входят обязательной составляющей в состав Государственной геологической карты России масштаба 1:1 000 000 третьего поколения (ГГК-1000/3). В качестве исследуемых параметров могут выступать геофизические поля, их трансформанты, результаты моделирования и т.п.

При среднемасштабных работах наиболее эффективным является использование двух дополняющих подходов: последовательное картирование прогнозных факторов локализации оруденения и использование вероятностных методов прогноза, основанных на применении алгоритмов распознавания образов [4]. Подход, основанный на последовательном картировании факторов локализации оруденения, оказался весьма результативным, например, при поисках гидрогенных месторождений урана [5].

Гидрогенные месторождения урана приурочены к существенно песчаным образованиям терригенных отложений неогеновых палеодолин, локализованных в эрозионно-тектонических депрессиях. Последовательная обработка аэроэлектроразведочных данных на разных частотах позволила закартировать впадины, выделить элементы погребенной гидросети и выявить

благоприятные условия для локализации гидрогенного уранового оруденения внутри впадин (рис. 7).

Технологии формального прогноза оруденения основаны на оценке меры близости между набором признаков с одной стороны (в качестве таковых используются измеренные геофизические поля, их трансформанты, результаты моделирования и т.п.) и эталонными объектами, а точнее — особенностями их проявления в поле анализируемых признаков. В качестве такой меры близости могут выступать коэффициенты, характеризующие тесноту связи между признаками и объектом и устанавливаемые эмпирически, на основе экспертного опроса, либо геометрически (теснота пространственной связи). В последние годы для решения сходных задач широко тестируются нейросетевые технологии, построенные на идеологии Big Data [11].

Выбор конкретного алгоритма должен учитывать структуру признакового пространства и особенности прогнозируемого объекта. Однако вполне очевидно, что при выполнении прогноза по комплексу геофизических данных его эффективность напрямую зависит от того, насколько устойчиво и надежно по этим данным могут быть локализованы геологические факторы контроля оруденения. Таким образом, эффективность формального прогноза в первую очередь зависит не от выбранного алгоритма распознавания образов, а от того, какие признаки использованы для обучения и распознавания.

Для решения подобных задач нами, в частности, используется алгоритм, разработанный специально для прогноза слабоконтрастных объектов по комплексу геолого-геофизических данных, представленных в количественной, полуквантитативной и качественной формах, в условиях неравномерной изученности территории разными методами [2, 6].

Одним из основных преимуществ упомянутого алгоритма является отсутствие необходимости предварительной селекции признаков по информативности. Это допускает использование заведомо избыточного набора исходных данных. В результате вычислений, помимо локализации площадей, близких по строению к эталону, удается решить следующие задачи.

1. Оценить меру близости (степень сходства) разнородных эталонов, используемых для распознавания, и сделать вывод о принадлежности к одному генетическому типу и, следовательно, целесообразности их совместного использования.
2. Определить контрастность тех или иных эталонных объектов в выбранном признаковом пространстве и оценить достоверность прогноза для разнородных объектов.
3. Оценить сравнительную информативность отдельных геолого-геофизических признаков, вовлеченных в прогноз.
4. Определить генетическую и формационную принадлежность целевых объектов по характерному набору наиболее информативных интервалов используемых геофизических параметров.
5. Выявить зональность в размещении генетически родственных объектов, что позволяет локализовать потенциальные источники рудного вещества.

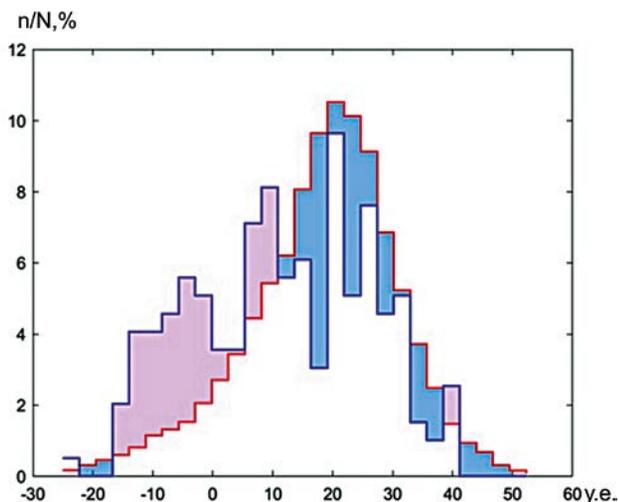


Рис. 6. Пример совмещенных гистограмм распределения параметра для генеральной совокупности (красная линия) и целевого объекта (синяя линия)

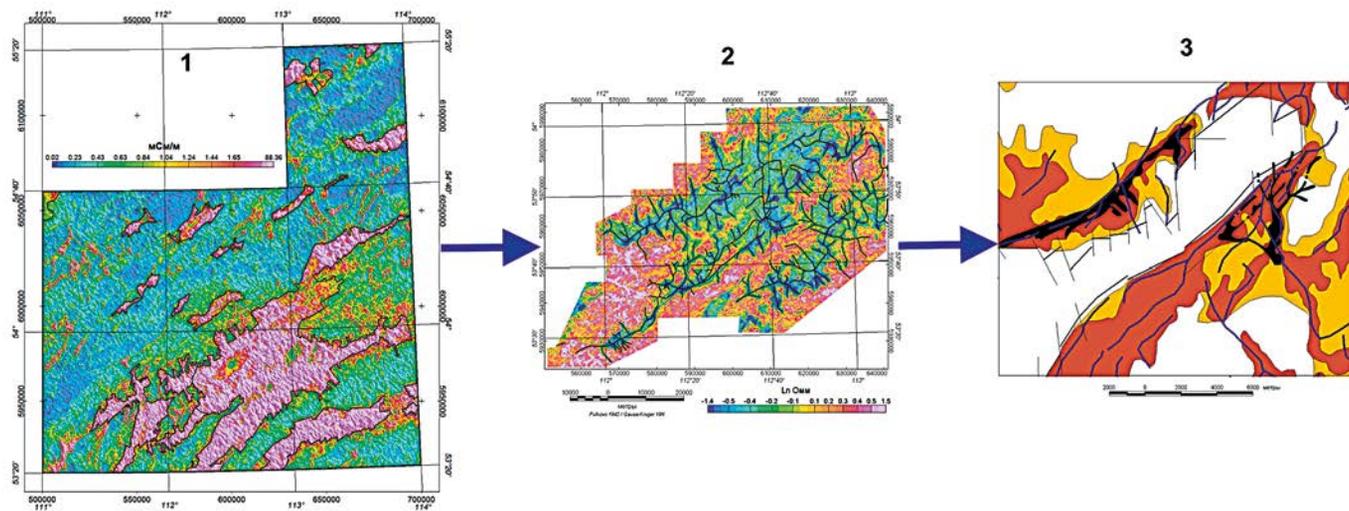


Рис. 7. Забайкалье. Поиски месторождений урана гидрогенного типа: 1 — контуры эрозионных впадин по данным аэроэлектроразведки (эффективные проводимости на частоте 520 Гц); 2 — проявленность палеодолин на картах приведенных сопротивлений для частот 520 — 2080 Гц; 3 — результаты дифференциации отложений палеодолин по аэрогеофизическим данным в сопоставлении с размещением урановородных залежей месторождений Дыбырин и Тетрахское (по материалам БФ «Сосновгеология»): песчаные и глинистые образования по данным аэроэлектроразведки показаны соответственно коричневым и желтым цветом, черная заливка — урановые залежи по результатам бурения

При использовании в качестве эталонов месторождений, рудопроявлений и точек минерализации по результатам формального прогноза выделяются перспективные объекты ранга рудных районов и рудных полей. По результатам детальных аэрогеофизических работ возможно прогнозирование размещения и отдельных рудных залежей, однако в этом случае в качестве эталонов для обучения должны использоваться известные по априорным данным залежи в пределах контура работ.

Пример результатов формального прогноза на различные типы оруденения приводится на рис. 8.

При поисках и оценке месторождений важная роль отводится методам локальной интерпретации данных, нацеленных в первую очередь на моделирование и количественную оценку изолированных геофизических аномалий. Подобного рода технологии активно разрабатываются как для потенциальных, так и для электромагнитных полей.

Для потенциальных (гравитационного и магнитного) полей разработаны технологии 3D-моделирования, базирующиеся на различных подходах: послойном моделировании (технология DVOP, [3]), автоматизированный подбор в заданном классе моделей (технология IGLA, [9]), инверсии полей. Выбор конкретного алгоритма должен осуществляться с учетом особенностей геологического строения территории, предполагаемых свойств объекта и модельных представлений, на которых он базируется. В частности, выглядящая весьма привлекательно технология, основанная на инверсии полей с получением распределения эффективных параметров (плотности или намагниченности) в нижнем полупространстве, без использования дополнительных ограничений может привести к получению так называемого «гармонического решения»,

т.е. распределения параметров, очень хорошо воспроизводящего наблюдаемое поле, но не имеющего ничего общего с реальной геологической ситуацией. Таким образом, механическое использование даже самых продвинутых методов интерпретации может оказаться неэффективным, их корректное использование требует весьма высокой квалификации исполнителя. Очевидным также представляется вывод о целесообразности комплексирования альтернативных методов 3D-моделирования, а также использования всего спектра априорной геолого-геофизической информации для снижения неоднозначности интерпретации.

Корректное использование методов 3D-моделирования позволяет выполнить оценку избыточных физических свойств аномальных объектов, оценить их геометрию и элементы залегания, определить природу и выполнить редуцирование их влияния из исходных полей, что в ряде случаев помогает существенно уточнить (в т.ч. в сторону увеличения) оценку ресурсного потенциала территорий.

Так, на рис. 9 приводится пример объемного картирования массива вольфрамоносных гранитоидов по результатам 3D-моделирования гравимагнитных данных. Выходы массива были отмечены предшественниками на небольшой территории в северной части площади. Результаты моделирования показали, что большая часть массива находится в слепом залегании и его размеры значительно превосходят предполагаемые по результатам геологического картирования.

Для электромагнитных полей часто за результаты 3D-моделирования выдаются синтезированные по результатам 1D-инверсии данные, формально собранные в объемную конструкцию. Поскольку в основу технологии заложена модель горизонтально слоистого разреза, результаты моделирования, полученные таким

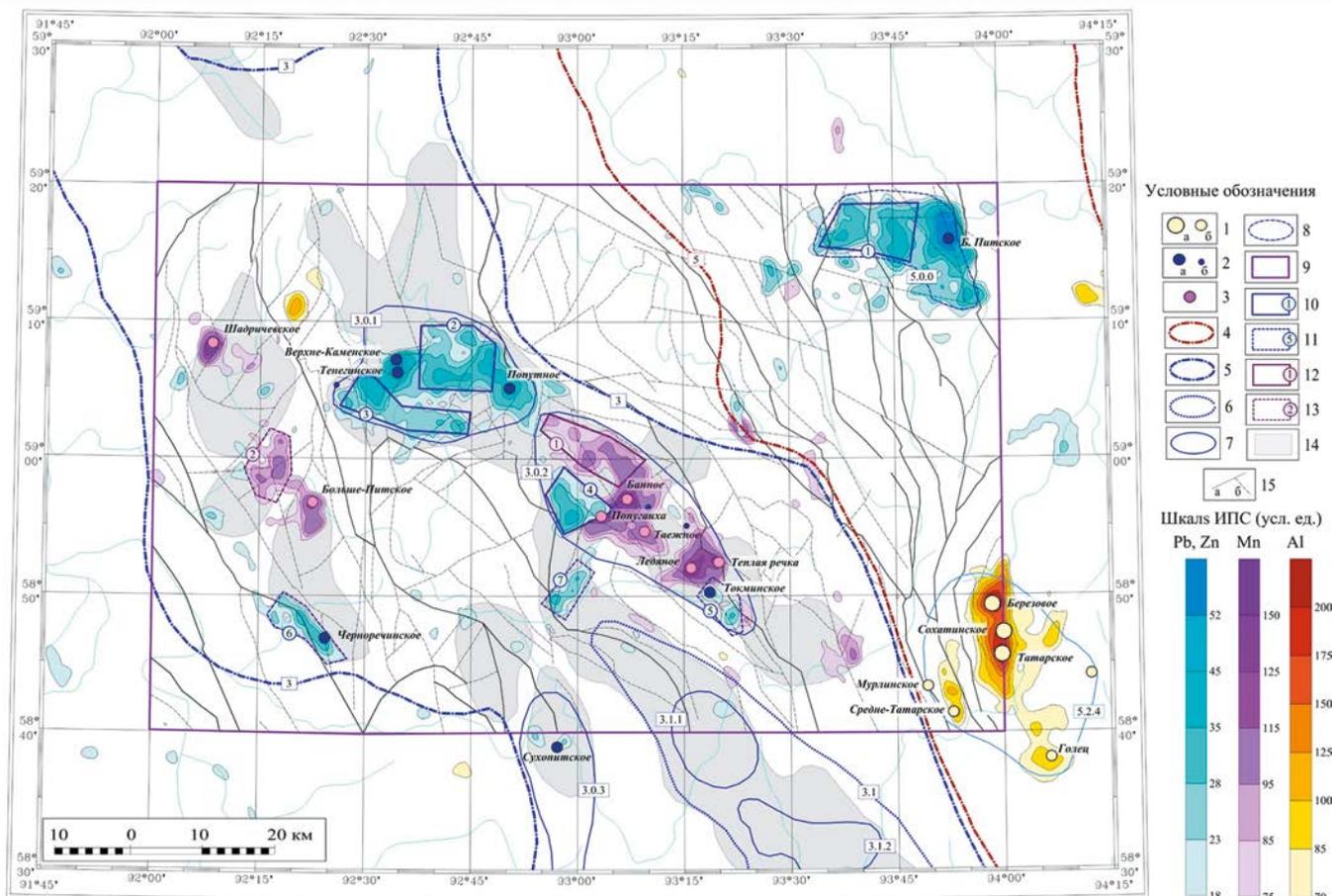


Рис. 8. Пример результатов формального прогноза на Pb-Zn, Mn и Al по геофизическим данным в сопоставлении с ретроспективными данными: 1–3 — эталонные объекты: 1 — месторождения (а) и проявления (б) Al; 2 — проявления (а) и пункты минерализации (б) Pb-Zn, 3 — проявления Mn, 4–7 — границы рудных таксонов (минерагенических зон, рудных районов и узлов) по ретроспективным данным: 4 — Центрально-Енисейская (Au, Sb, W) МЗ; 5 — Тенегинско-Горевская (Pb, Zn, Mn, Au, TR, U) МЗ; 6 — Ангарский Pb-Zn-Al-Nb PP; 7 — рудные узлы; 8 — вновь выделенный Большепитский рудный узел (Pb, Zn-Au); 9 — контур листов O-46-IX, X; 10–13 — перспективные участки и их номера: 10, 11 — на Pb-Zn: 10 — 1-й очереди, 11 — 2-й очереди; 12, 13 — на Mn: 12 — 1-й очереди, 13 — 2-й очереди; 14 — площади, выделенные предшественниками (Забияка и др., 2004) как перспективные на Pb-Zn оруденение; 15 — разломы: (а) — главные, (б) — второстепенные

способом, могут быть весьма далеки от реальности. В то же время технологии 3D-инверсии электромагнитных полей развиваются высокими темпами, хотя и реализованы пока в основном для тел простой формы. При этом 3D-моделирование перспективных аномалий электромагнитного поля с учетом как проводящих, так и поляризационных свойств объекта позволяет обоснованно проектировать заверочные работы.

Определенные проблемы с использованием аэрогеофизических технологий могут возникнуть при выполнении детальных сопровождающих геофизических работ при оценке и предварительной разведке месторождений. Эти проблемы связаны с тем, что размеры площадей под такие работы обычно не превышают первых десятков квадратных километров, и использование традиционной аэрогеофизики становится нерентабельным из-за, с одной стороны — повышения удельной стоимости затрат на организацию и ликвидацию работ, что заметно повышает стоимость погонного километра съемки, а с другой стороны — трудности обеспечения необходимой детальности работ. Выходом

здесь может послужить использование беспилотных технологий, бурно развивающихся в последнее время.

Вопрос о месте беспилотных технологий в комплексе современных прогнозно-поисковых работ заслуживает отдельного обсуждения, здесь же отметим лишь, что в настоящее время с их помощью достигается получение кондиционных материалов лишь для магнитной съемки. Использование детекторов малого объема для аэрогамма-спектрометрии позволяет получить удовлетворительные результаты только по интегральному каналу (мощность дозы суммарного гамма-излучения), для определения концентраций естественных радионуклидов требуется выполнять накопление спектра не менее 30–40 сек., что либо заметно увеличивает затраты времени и средств на выполнение работ (измерения с «зависанием»), либо заметно ухудшает пространственное разрешение съемки (при выборочном формировании спектра при пролете через заданную область).

Основной ошибкой при использовании беспилотных технологий, на наш взгляд, являются попытки использования при их реализации методик и технологий,

заимствованных из традиционной аэрогеофизики. При таком подходе вся проблема сводится лишь к смене носителя, что на самом деле заметно ограничивает возможности развития этих технологий. Их прогресс должен основываться на целевых аппаратно-технических и методических разработках. В области гамма-спектрометрии, в частности, речь может идти о разработке спе-

циализированных беспилотных комплексов с объемами детекторов 8 л и более, в электроразведке перспективными представляются технологии с использованием наземных питающих линий и детекторов, перемещаемых летательным аппаратом. Активное использование беспилотных носителей тормозится, кроме того, отсутствием необходимой законодательной базы.

Считаем необходимым заметить при этом, что использование беспилотных носителей не может являться самоцелью, и во всех случаях должно быть обосновано методически и экономически.

Заключение

Современные аэрогеофизические технологии являются эффективным, а во многих случаях и альтернативным средством оптимизации геологоразведочного производства при решении задач прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых.

Однако ожидаемый от их применения результат достигается лишь при соблюдении всех канонических требований качества на всех этапах работ, начиная от определения состава комплекса методов и элементов методики съемки и заканчивая выбором и корректным использованием технологий моделирования и интерпретации данных. Это определяет весьма жесткие требования к уровню профессиональной подготовки и квалификации исполнителей.

К сожалению, в настоящее время подготовка специалистов указанного направления в России не ведется, это насущная проблема, решение которой нужно найти в кратчайшие сроки. Для повышения же эффективности использования современных аэрогеофизических технологий необходимы встречные усилия исполнителей и потребителей работ, направленные с одной сто-

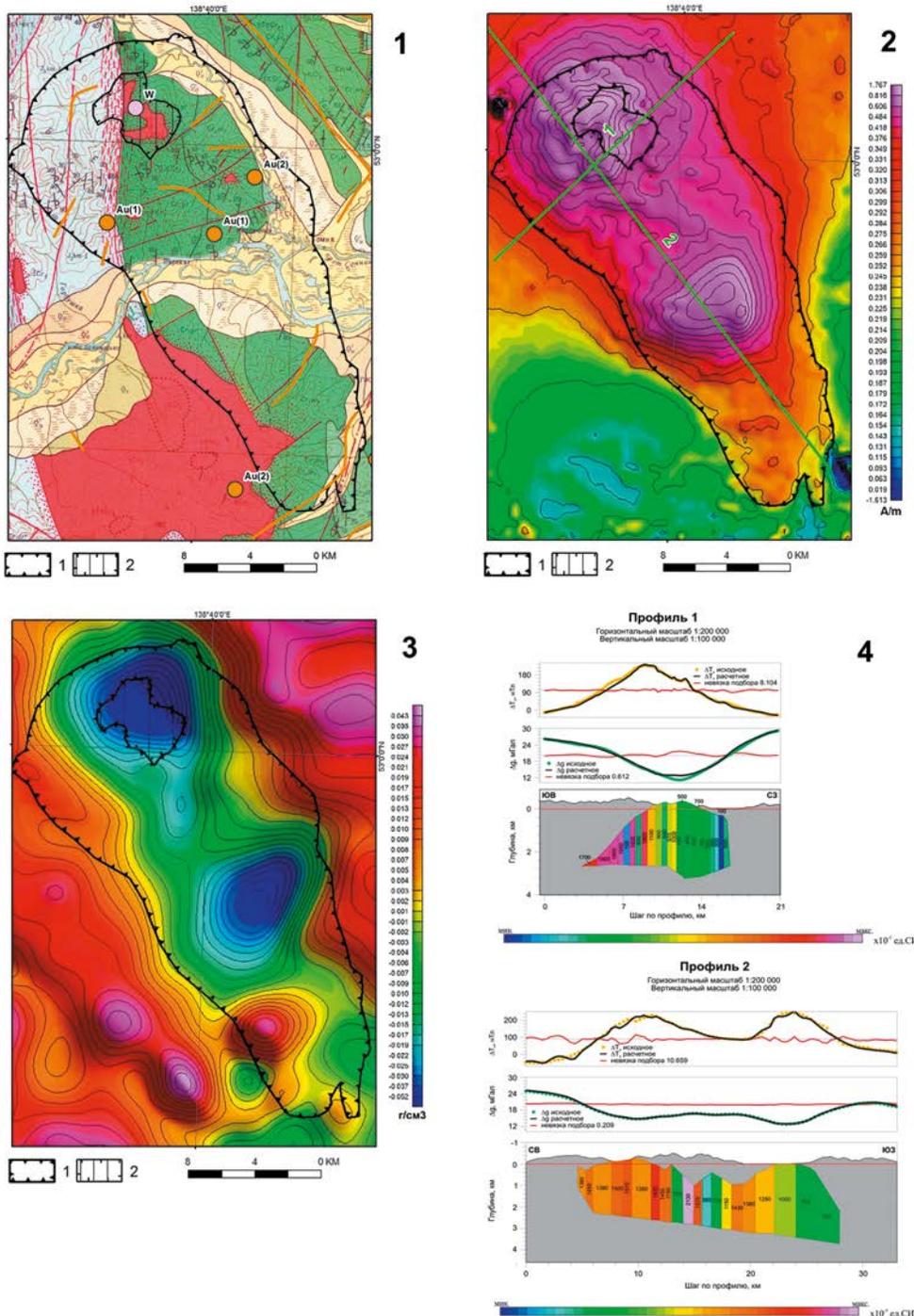


Рис. 9. Отражение вольфрамоносных гранитоидов Большереченского массива на геологической карте предшественников (1); на карте эффективной намагниченности по результатам 3D-моделирования магнитного поля (2); на карте эффективной плотности по результатам 3D-моделирования гравитационного поля (3); на разрезах согласованной гравимагнитной модели (4): 1 — контур массива по ретроспективным данным; 2 — контур массива по геофизическим данным

роны — на усиление геологической содержательности результатов интерпретации комплексных геофизических данных, а с другой стороны — на повышение геофизической грамотности геологов, использующих результаты геофизических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афонин, А.А.* О возможности построения бесплатформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата / А.А. Афонин, А.С. Сулаков, Г.Г. Ямашев, Д.А. Михайлин, Л.А. Мирзоян, Д.В. Курмаков // Труды МАИ, 2013. — № 66.
2. *Бабаянц, П.С.* Алгоритм решения прогнозно-поисковых задач в рамках вероятностно-статистического подхода для качественных признаков / П.С. Бабаянц // Изв. вузов. Геология и разведка. — 1990. — N 1.
3. *Бабаянц, П.С.* Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 31-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / П.С. Бабаянц, Ю.И. Блох, А.А. Трусов. — М: ОИФЗ РАН, 2004. — С. 11.
4. *Бабаянц, П.С.* Аэрогеофизические технологии при поисках месторождений золота: современные тенденции / П.С. Бабаянц, О.Р. Контарович, А.А. Трусов // Золото и технологии. — 2018. — № 4(42). — С. 100–104.
5. *Бабаянц, П.С.* Комплексные аэрогеофизические работы при поисках месторождений урана гидрогенного типа / П.С. Бабаянц, А.А. Трусов, Т.Ю. Лаврова // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 7. — С. 56–60.
6. *Бабаянц, П.С.* Пакет программ прогноза слабопроявленного оруденения по комплексу геофизических данных / П.С. Бабаянц, А.А. Трусов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 36-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. Казань, 26–31 января 2009 г. — С. 29–31.
7. *Багрянский, А.А.* MobileMT — следующий шаг в развитии аэроэлектромагнитных систем / А.А. Багрянский / Майнекс-2018, материалы форума / <http://minexrussia.com/2018/speakers/andrej-aleksandrovich-bagryanskij/>.

8. *Багрянский, А.А.* Аэроэлектромагнитная технология ZTEM для глубинного изучения недр / А.А. Багрянский, А.Ю. Приходько, Н. Боурнас, Ж. Лего // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 5. — С. 36–41.
9. *Блох, Ю.И.* Программа «IGLA» для интерактивной экспресс-интерпретации локальных гравитационных и магнитных аномалий / Ю.И. Блох, А.А. Трусов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 34-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М: ИФЗ РАН, 2007. — С. 36–38.
10. *Дортман, Н.Б.* Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / Н.Б. Дортман. — М.: Недра, 1992. — 391 стр.
11. *Колмаков, А.В.* Моделирование морфологии отражающих горизонтов в межпрофильном пространстве по данным потенциальных полей методами глубокого обучения / А.В. Колмаков, А.А. Трусов, А.Л. Мейснер, Г.С. Григорьев // Тр. III Междунар. геолог-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии» Т. III (III) [сборник]. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. — С. 94–99.
12. *Dransfield, M.H.* The FALCON® airborne gravity gradiometer systems / M.H. Dransfield, J.B. Lee // Geoscience Australia Record 2004/18: Airborne Gravity 2004: Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, P. 15–20.
13. *Herrera-May, A.* Recent Advances of MEMS Resonators for Lorentz Force Based Magnetic Field Sensors: Design, Applications and Challenges / Herrera-May, J. Soler-Balcazar, H. Vázquez-Leal, J. Martínez-Castillo, M. Viguera-Zuñiga, L. Aguilera-Cortés / Sensors (2016). — 16(9). — P. 1359.
14. *Murphy, C.A.* The Air-FTG™ airborne gravity gradiometer system / C.A. Murphy // Geoscience Australia Record 2004/18: Airborne Gravity 2004: Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop. — P. 7–14.
15. *Schmidt, P.* GETMAG — a SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration / P. Schmidt, D. Clark, K. Leslie, M. Bick, D. Tilbrook, C. Foley / Exploration Geophysics (2004) 35. — P. 297–305.

© Бабаянц П.С., Контарович О.Р., Трусов А.А., 2020

Бабаянц Павел Суренович // bab@aerogeo.ru
Контарович Олег Рафаилович // olegk@aerogeo.ru
Трусов Алексей Андреевич // trusov@aerogeo.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.379

Нерадовский Л.Г.¹, Фёдорова Л.Л.² (1 — Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 2 — Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск)

МОДЕЛИ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО УЧАСТКА АВТОДОРОГИ «ВИЛЮЙ» В ЯКУТСКЕ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Представлены результаты исследований мерзлых грунтов методом георадиолокации по автодороге «Вилуй» в Якутске. Математическая обработка и статистический анализ кинематических и динамических атрибутов сигналов георадиолокации позволили построить структурную и петрофизическую модели. На их основе описаны главные особенности и детали очень сложного строения итоговой инженерно-геологической модели мерзлого грунтового основания автодороги. Погрешность глубины залегания литолого-фациальных и криогенных (по температуре и льдистости) границ мерзлых грунтов озерно-болотного и аллювиального генезиса в 70 % случаев составила $\pm 0,42$ м.

Ключевые слова: автодорога, мерзлые грунты, скважины, георадиолокация, глубина, время задержки и амплитуда импульсов, коэффициент затухания, модели.

Neradovskiy L.G.¹, Fedorova L.L.² (1 — Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, 2 — Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk)

MODELS OF THE RECONSTRUCTED SECTION OF THE «VILUY» ROAD IN YAKUTSK BASED ON GPR DATA

The results of studies of frozen soils by the GPR on the Viluy road in Yakutsk are presented. Mathematical processing and statistical analysis of the kinematic and dynamic attributes of