

Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.
ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА ПО
ДАНЫМ МАГНИТОРАЗВЕДКИ

Информация о рельефе кровли кристаллического фундамента платформенных областей является весьма важной при решении разнообразных геологических задач, как региональных, так и поисковых, в том числе связанных с поисками месторождений нефти и газа в самом фундаменте и в унаследованных структурах осадочного чехла.

Обычно построение карт рельефа кровли погребенного фундамента производится по данным бурения и сейсморазведки, 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 дает крайне ненадежные результаты, и тогда зачастую прибегают к заполнению получающихся лагун на основании данных о структуре гравитационного поля 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. Таким образом, в районах, где структурные карты поверхности 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 в плитной части платформ можно значительно повысить за счет привлечения дополнительной информации, получаемой с помощью магнитной 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.

Основные методы определения глубин поверхности фундамента по данным магнитометрии, применяемые в настоящее время на практике, связаны с анализом особых точек (особенностей) функций, описывающих аномальные поля, т.е. точек, в которых функция теряет свою аналитичность. В 1956 г. В.К. Иванов впервые предложил определять глубину верхней особенности по амплитудному спектру [2]. Он теоретически показал, что амплитудный спектр на высоких частотах асимптотически стремится к экспоненте с декрементом, равным глубине самой верхней из особенностей. Эта идея была положена в основу целого ряда технологий, реализованных в нескольких компьютерных программах, активно применявшихся на практике [4].

За рубежом практически та же идея была предложена в 1970 г. А. Спектором и Ф. Грантом [12] для мультиблочных моделей и с тех пор широко применяется там для решения разнообразных практических задач. В 90-х гг. XX в. появился ряд работ, указывающих на то, что реальные среды за счет совместных влияний разнородных блоков могут создавать аномальные поля со спектрами других типов. С одной стороны, в 1994 г. Дж. Гарсия-Абдеслем и Дж. Несс продемонстрировали [7], что при анализе сред с равномерным и нормальным распределениями свойств блоков может происходить систематическое занижение глубин, определяемых по методике Спектора и Гранта. С другой стороны, в 1997 г. М. Феди, Т. Кварта

и А. Де Сантис указали на то, что, если реальная среда является фрактальной, это может привести, наоборот, к систематическому завышению глубин, определяемых по подобной методике [6]. Подчеркнем, что обычно такие определения проводятся по полю, редуцированному к полюсу, без учета реальной высоты точек наблюдений над геоидом.

Другим способом решения указанной задачи, нашедшим широкое практическое применение, является технология, основанная на так называемой деконволюции Эйлера, использующая одноименное уравнение для однородных функций. Эта методика впервые была предложена американцем Д. Томпсоном в 1982 г. в профильном варианте [13], а в 1990 г. была распространена британскими геофизиками во главе с А. Рэйдом на трехмерный случай [11], после чего вошла во многие интерпретационные системы. С ее помощью в скользящем окне путем решения линейной обратной задачи для уравнения Эйлера определяются координаты единственной особенности заданного типа, характеризующей большую часть энергии поля в этом окне. Результаты применения данной методики представляют собой облака точек, как правило, приуроченных в плане к градиентным зонам аномального поля. Точность определения глубин особенностей с помощью деконволюции Эйлера в руководствах к современным интерпретационным системам оценивается в 15 %. Несмотря на то, что в итоге применения этой технологии на картах остаются огромные лакуны, вообще не содержащие особых точек, деконволюцию Эйлера зачастую рекомендуют как основной метод быстрой оценки параметров аномалообразующих источников [3].

К указанной методике в некотором смысле близка так называемая деконволюция Вернера, впервые предложенная С. Вернером в 1953 г. для определения параметров тонких пластин [14] и в дальнейшем модифицировавшаяся многими исследователями. Она также фактически сводится к решению линейной обратной задачи при аппроксимации поля в скользящем окне выражениями типа рациональных дробей. Недавно М. Набигян и Р. Хансен указали на возможность унификации этих двух методик для трехмерных моделей [10].

В настоящей статье рассматривается обобщившая предыдущие достижения в этой области технология ROMGAS, которая входит в пакет интерпретационных программ СИГМА-3D. Она базируется на определении координат особых точек функций, описывающих магнитные аномалии, по амплитудному спектру, вычисляемому в скользящем окне, и характеризуется следующими основными чертами:

1. Определение глубины особенности ведется в квадратном скользящем окне, размеры которого должны примерно на порядок превышать ожидаемые глубины фундамента. Расчеты ведутся непосредственно по аномальному полю, и никакого предварительного редуцирования к полюсу производить не надо. В результате интерпретатор получает оценки альтитуд особенностей по равномерной сети. Их совокупность фактически характеризует огибающую множества особенностей, которую обычно называют главной магнитоактивной поверхностью (ГМАП). Чаще всего ГМАП совпадает с поверхностью кристаллического фундамента, но, естественно, возможны и отклонения. С одной стороны, если верхняя часть кристаллического фундамента сложена практически немагнитными породами, то ГМАП проходит глубже и в этом случае несет информацию о глубинах залегания намагниченных пород в слепом и скрытом залегании. С другой стороны, при наличии в осадочном чехле интрузий или мощных толщ эффузивно-осадочных отложений, отличающихся высокой намагниченностью, ГМАП проходит на меньшей глубине, нежели та, на которой расположена поверхность фундамента. К ограничениям данной технологии относится также ошибки определения глубин в областях развития узких грабенообразных структур. Очевидно, что в скользящем окне, размеры которого в плане могут значительно превышать поперечные размеры структуры, локализуемые верхние особенности расположены на ее бортах, а не на дне. Тем не менее, несмотря на указанные ограничения, технология ROMGAS показала себя весьма эффективной в самых разнообразных геологических условиях.

2. Если исходное поле задано в узлах равномерной сети, вычисление двумерного спектра проводится стандартно с применением процедуры быстрого преобразования Фурье.

3. Если исходное поле задано по неравномерной сети с учетом высоты точек наблюдения над геоидом, двумерный спектр вычисляется аппроксимационно с помощью отрезков соответствующих двумерных рядов Фурье.

Впервые идея аппроксимационного вычисления спектров по наблюдениям на неравномерной трехмерной сети, была опубликована, видимо, Р. Гендерсоном и Л. Корделлом в 1971 г. [8], при этом они сослались на то, что их подход является развитием еще более ранней работы В. Джеймса 1966 г. [9]. С тех пор идея использовалась разными геофизиками в различных программах, в том числе одним из авторов настоящей статьи в интегрированной системе «Сингуляр» [1]. В последние годы В.Н. Страхов и И.А. Керимов активно разрабатывают оригинальную модификацию аппроксимационного спектрального анализа на базе метода интегральных представлений [5].

Количество гармоник, которые вычисляются программой ROMGAS, естественно, значительно меньше числа точек наблюдений. Дело в том, что обычно в скользящее окно, например, 30×30 км попадают несколько десятков тысяч точек, например, аэромагнитной съемки масштаба 1:50 000, а для устойчивого определения глубины искомой особенности, характеризующей ГМАП, достаточно получить всего около тысячи начальных гармоник. Решение линейной обратной задачи в процессе их определения производится с помощью метода регуляризации.

4. Непосредственное определение глубины особенности, характеризующей ГМАП, может вестись двояко. В первом варианте вычисленный двумерный спектр радиально усредняется, логарифмируется, а затем аппроксимируется на некотором (автоматически выбираемом программой) участке прямой линией, угловой коэффициент которой и является оценкой искомой глубины. Такой подход, вообще говоря, имеет широкое распространение, в частности, применяется в известной интегрированной системе “Geosoft”.

Во втором варианте аппроксимации непосредственно подвергается множество значений логарифма модуля амплитудного спектра и соответствующих пространственных частот $\omega = \sqrt{\mathbf{u}^2 + \mathbf{v}^2}$, причем линия регрессии строится по всем низким частотам. Чтобы пояснить этот подход, обратимся к реальному примеру. На рис. 1а и 1б показаны аномальное магнитное поле ΔT в пределах окна 30×30 км и рельеф дневной поверхности над одной из скважин, пробуренных на юге Московской синеклизы. По данным бурения альтитуда кровли кристаллического фундамента здесь составляет –586 м. На рис. 1в изображена корреляционная зависимость логарифма модуля амплитудного спектра поля, редуцированного к средней высоте наблюдений, от пространственной частоты. Общее число использованных при этом гармоник составляет 900 (30×30). Проведенная линия регрессии имеет угловой коэффициент, соответствующий альтитуде особенности –599 м. Обратим внимание на то, что в самой низкочастотной части спектра число точек сравнительно мало, и они не являются существенной помехой для определения глубины искомой особенности, как это было бы в первом варианте при предварительном радиальном усреднении спектра.

Полученная первым или вторым способом информация рассматривается нами не как реальная глубина, а лишь как ее коррелят, поскольку заранее обычно не бывают известными ни закон распределения физических свойств каждого из разнородных блоков в пределах изучаемой площади, ни фрактальная размерность намагниченности фундамента. Тем не менее, в условиях, когда никакой априорной информации об изучаемой поверхности вообще нет, вычисленные описанным путем глубины могут быть сами по себе приняты в качестве оценки морфологии кровли фундамента.

5. После выполнения вычислений в скользящем окне на всей исследуемой площади, для учета поправок за совместное, ансамблевое влияние блоков фундамента, полученные данные методами линейной регрессии увязываются с имеющейся по площади работ априорной

информацией об изучаемой поверхности, главным образом, полученной бурением. Это позволяет провести окончательную настройку результата вычислений на специфику изучаемой территории, в том числе на фрактальную размерность модели фундамента. Заметим, что подобная настройка позволяет лишь уточнить абсолютные значения глубин, общий структурный план остается неизменным.

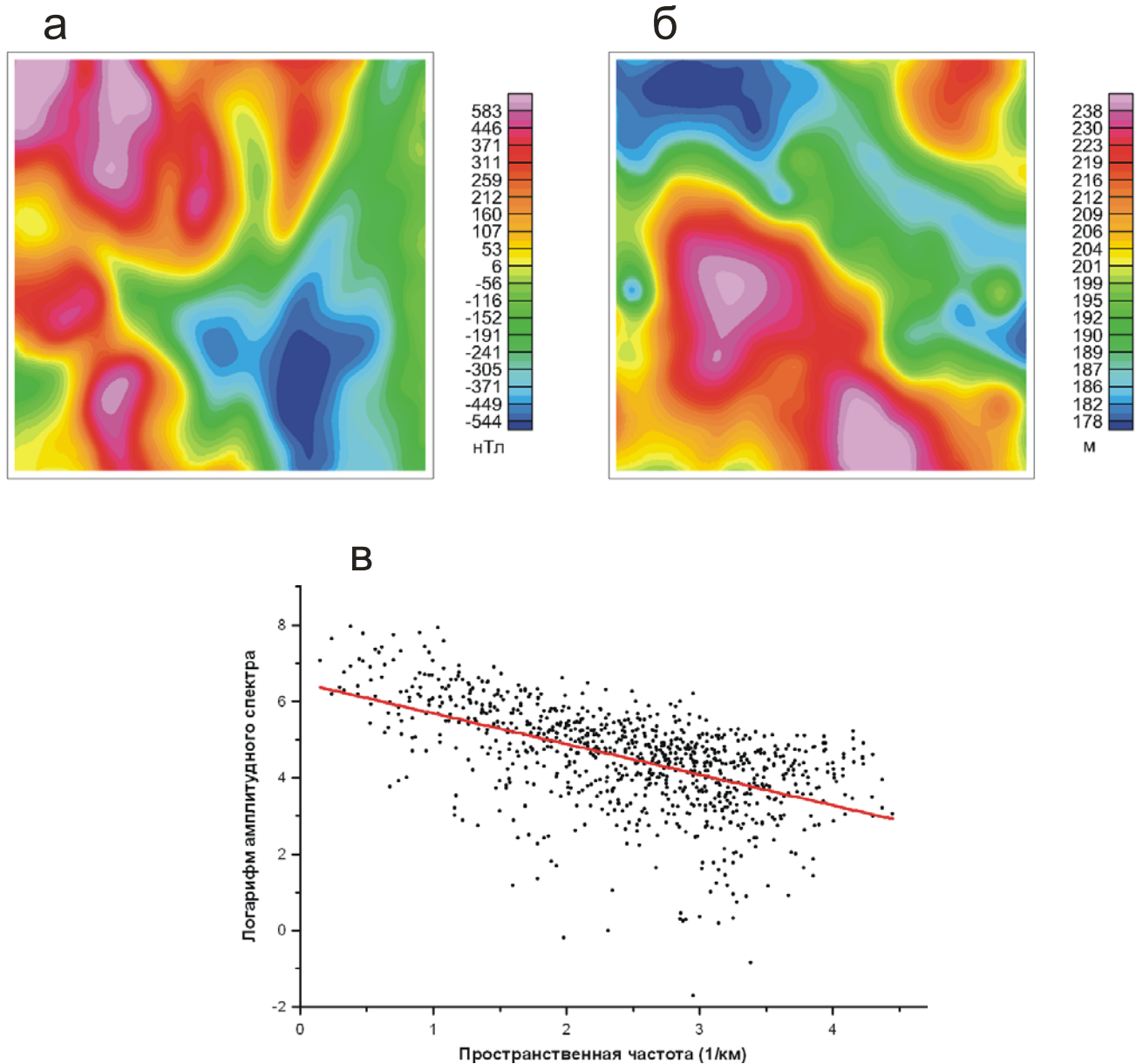


Рис. 1. Определение глубины главной магнитоактивной поверхности над скважиной в окне 30×30 км: а) аномальное магнитное поле ΔT ; б) рельеф дневной поверхности; в) кросс-плот зависимости логарифма модуля амплитудного спектра поля, редуцированного к средней высоте наблюдений, от пространственной частоты и линия регрессии, угол наклона которой характеризует глубину.

Программа ROMGAS применялась в различных геологических условиях и показала высокую эффективность. Фактически с ее помощью уже проведено изучение рельефа кровли кристаллического фундамента примерно на 20 % территории Российской Федерации. Точность

определения ГМАП при этом обычно не хуже 10 %, а в благоприятных условиях значительно выше.

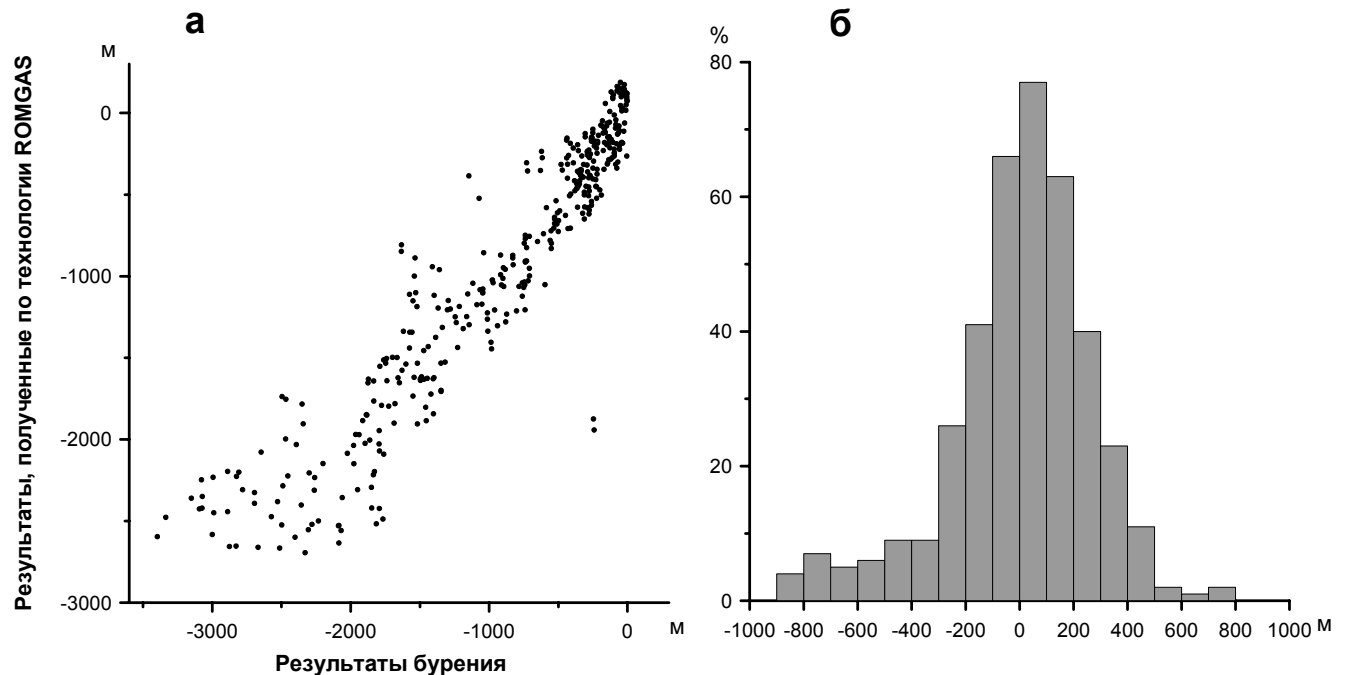


Рис. 2. Сопоставление altitudes кровли фундамента по данным ROMGAS с данными бурения в пределах Московской синеклизы: а) кросс-плот по данным бурения в 394 скважинах и по технологии ROMGAS; б) гистограмма разностей глубин, определенных по данным бурения и по технологии ROMGAS.

На рис. 2а показан кросс-плот, построенный по результатам сопоставления данных бурения 394 скважин в пределах Московской синеклизы с данными ROMGAS, а на рис. 2б - гистограмма соответствующих разностей глубин. Их анализ показывает, что с помощью описываемой технологии получены вполне достоверные результаты всюду, за исключением участков развития авлакогенов. Там верхние особенности в скользящем окне размерами 50×50 км 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 0,940. Отметим, что большая часть указанной площади покрыта лишь аэромагнитной съемкой масштаба 1:200 000 еще в 60-х годах XX в. Для материалов современных детальных и прецизионных съемок точность определения глубин ГМАП еще выше.

В качестве примера приведем результаты изучения ГМАП в Предволжье Татарстана по материалам аэромагнитной съемки масштаба 1:25 000. На рис. 3а изображена исходная карта изодинам ΔT с нанесенными на нее точками расположения глубоких скважин, а на рис. 3б - итоговая карта главной магнитоактивной поверхности по данным ROMGAS. Среднеквадратическая погрешность определения глубины кровли кристаллического фундамента на этой площади составила 26,4 м при средней глубине около 2 км. На рис. 3г показаны результаты сопоставления результатов, полученных по технологии ROMGAS с данными бурения, коэффициент корреляции между ними оказался равным 0,805. Для сравнения на рис. 3в представлены результаты применения на данной площади способа деконволюции Эйлера при структурном индексе, равном 0, то есть ориентированном на выявление контактов между породами. Эти определения проведены средствами системы "Geosoft". На рисунке

видно, что особые точки, найденные с помощью деконволюции Эйлера, расположены в полосе глубин от 300 м до 2,5 км, и по ним весьма сложно судить о реальной морфологии кровли фундамента. Фактически для данной площади технология ROMGAS дала принципиально лучшие результаты по сравнению с методикой деконволюции Эйлера.

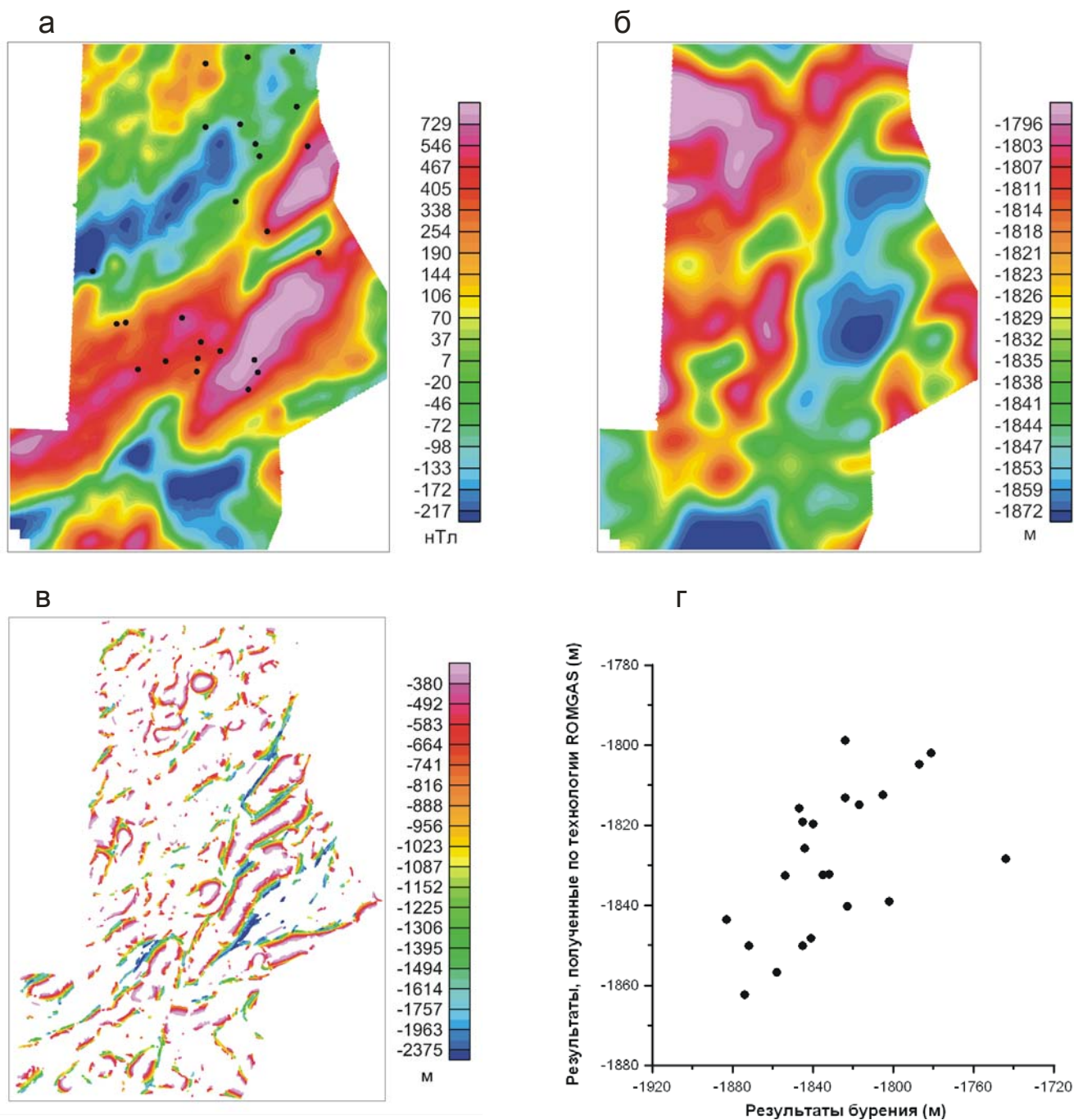


Рис. 3. Результаты определения рельефа кровли кристаллического фундамента по данным аэромагниторазведки масштаба 1:25000 в Предволжье Татарстана: а) карта изодинам ΔT с нанесенными точками глубоких скважин; б) карта главной магнитоактивной поверхности по данным ROMGAS; в) карта особых точек, найденных с помощью деконволюции Эйлера средствами системы “Geosoft” при структурном индексе, равном 0; г) кросс-плот альтитуд кровли фундамента по данным бурения и технологии ROMGAS.

Таким образом, технология ROMGAS показала свою эффективность в различных геологических условиях, и может рекомендоваться в качестве базовой методики для интерполяции данных бурения и сейсмоки при построении карт рельефа поверхности фундамента. Даже при отсутствии априорной информации технология ROMGAS дает возможность получать достаточно точные оценки искомым глубин.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 03-05-64292.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н. Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе "Сингуляр" // Известия вузов. Геология и разведка. 1993. № 6. с. 123-127.
2. Иванов В.К. О распределении особенностей потенциала // Успехи математических наук. 1956. т. 11. вып. 5(71). с. 67-70.
3. Методические рекомендации по геофизическому обеспечению геологосъемочных работ масштаба 1:200 000. СПб: ВИРГ-Рудгеофизика. 2000. 240 с.
4. Серкеров С.А. Спектральный анализ в гравиразведке и магниторазведке. М: Недра. 1991. 279 с.
5. Страхов В.Н., Керимов И.А. Аппроксимационная реализация спектрального анализа в гравиметрии и магнитометрии // Основные проблемы теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. М: ОИФЗ РАН. 1999. с. 183-206.
6. Fedi M., Quarta T., De Santis A. Inherent power-law behavior of magnetic field power spectra from a Spector and Grant ensemble // Geophysics. 1997. v. 62. N 4. pp. 1143-1150.
7. Garcia-Abdeslem J.G., Ness G.E. Inversion of the power spectrum from magnetic anomalies // Geophysics. 1994. v. 59. N 3. pp.391-401.
8. Henderson R.G., Cordell L. Reduction of unevenly spaced potential field data to a horizontal plane by means of finite harmonic series // Geophysics.1971. v. 36. N 5. pp. 856-866.
9. James W.R. Fortran IV program using double Fourier series for surface fitting of irregularly spaced data // Kansas Geol. Survey. Computer Cdontr. 1966. 5. 19 p.
10. Nabighian M.N., Hansen R.O. Unification of Euler and Werner deconvolution in three dimensions via the generalized Hilbert transform // Geophysics. 2001. v. 66. N6. pp. 1805-1810.
11. Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millett A.J., Somerton I.W. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution // Geophysics. 1990. v. 55. N 1. pp. 80-91.
12. Spector A., Grant F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data // Geophysics. 1970. v. 35. N 2. pp. 293-302.
13. Thompson D.T. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data // Geophysics. 1982. v. 47. N1. pp. 31-37.
14. Werner S. Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies // Sveriges Geologiska Undersok. 1953. Ser. C. C. Arsbok 43. No. 6.