

УДК 550.83.016 (571.51)

© С.М.Макеев, 2014

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

С.М.Макеев (ИГДГиГ СФУ)

Исследование пространственной корреляции 562 золоторудных объектов Енисейского кряжа и положительных аномалий гравитационного поля показало ее положительный характер. Приведена математическая модель оригинального метода частотно-азимутального анализа поля, описан способ пространственной корреляции точечных объектов и геофизических аномалий. Рассмотрен ряд геолого-геохимических и тектонических процессов уплотнения горных пород, благоприятных для формирования золоторудных месторождений. Сделан вывод о возможности прогнозирования золоторудных структур на основе гравиметрии.

Ключевые слова: месторождения золота, пространственная корреляция, гравитационное поле, частотно-азимутальный анализ, уплотнение горных пород, надвиги, прогнозирование.

Макеев Станислав Михайлович, smmakeev@mail.ru

SPATIAL CORRELATION OF THE GRAVITATIONAL FIELD AND GOLD OBJECTS OF THE YENISEI RIDGE

S.M.Makeev

The paper investigated the spatial correlation of 562 gold objects of the Yenisei Ridge and positive anomalies of the gravitational field, which resulted in a positive character, set such a correlation. Shows a mathematical model of the original method for frequency-azimuthal analysis of field, describes a method for the spatial correlation of point objects and geophysical anomalies. Discussed geological and geochemical processes hardening rocks, favorable for the formation of gold deposits. Conclusion on the possibility of forecasting gold structures based on gravity.

Key words: gold deposits, the spatial correlation, the gravitational field, the frequency-azimuthal analysis, hardening rocks, thrusts, prediction.

Известно, что в основе прикладной гравиметрии лежит теория потенциала и его первых производных. Безупречно разработанная эта теория дает возможность математического моделирования распределения точечных масс в геологическом пространстве. Реализуется моделирование путем построения плотностных геолого-геофизических разрезов, представляющих интерес главным образом для региональной и нефтяной геологии [12].

Зададимся вопросом: является ли моделирование разрезов, составленных из компактных масс с центрально-симметричным полем, единственным направлением развития интерпретационных возможностей гравиметрии? В общей форме ответ на вопрос следует из замечания, сделанного авторами одного из самых глубоких учебников современной физики: «Надо, однако, уточнить, что для полного определения распределения и движения материи в случае гравитационного поля к уравнениям Эйнштейна надо присоединить еще (не содержащееся, конечно, в них) уравнение состояния вещества, т.е. уравнение, связывающее между собой давление и плотность. Это уравнение должно быть задано наряду с уравнениями поля¹. Уравнение состояния

связывает между собой в действительности не две, а три термодинамические величины, например давление, плотность и температуру вещества. В приложениях теории тяготения это обстоятельство, однако, обычно не существенно...» [7].

Исходя из теории гравитационного потенциала, знание термодинамических условий формирования геологических масс не существенно, но это не означает, что такие условия в реальности не влияют на величину и пространственную структуру гравитационного поля от этих масс. Сама идея современного способа интерпретации данных гравиметрии как будто не учитывает возможности извлечения информации о термодинамической истории геологических масс, поскольку эта возможность изначально не заложена в теорию гравитационного потенциала.

С другой стороны, дополнить теорию гравитационного потенциала точными уравнениями термодинамики не просто, поскольку в приложениях к открытым геологическим системам эти уравнения должны содержать переменную времени. Поэтому, чтобы «оправдать» расширение информативных возможностей гравиметрии, целесообразно при-

¹ То есть независимо от последних.

нять более общую формулировку понятия геофизического поля. Далее, поле понимается как инструментально измеренное состояние окружающей среды, причинно связанное с временным геологическим равновесием между вещественным составом и термодинамическим состоянием горных пород, зафиксированным в форме величин того или иного физического свойства. Естественно распространить эту формулировку и на гравитационное поле от объектов геологической природы.

Известно, что одним из ключевых факторов пространственного размещения гидротермальных месторождений золота является структурно-тектоническая обстановка, способствующая формированию зон дизъюнктивной, открытой трещиноватости горных пород. Физически такая обстановка должна возникать в плотных блоках пород, обладающих повышенной механической жесткостью, причем не обязательно, чтобы эти блоки изначально отличались литологическим составом от основной массы вмещающих пород. Достаточно (вероятно, это более общий случай в природе), чтобы определенный период времени некоторые объемы горных пород находились в условиях тектонического сжатия, т.е. в термодинамических условиях, благоприятных для процессов метаморфогенного уплотнения — «схлопывания» пор и перекристаллиза-

ции минеральных зерен (бластеза). Неизбежное при этом перераспределение путей миграции воды должно привести к важному эволюционному результату — блоки уплотненных дегидратированных пород будут деформироваться преимущественно по упруго-сколовому механизму, образуя катакластические породы, а блоки разуплотненных гидратированных пород — по вязко-пластичному, формируя породы милонитового ряда. Естественно, что «чистые линии» катаклазитов и милонитов практически не встречаются, и речь может идти только о преобладании в породах того или иного типа деформации [11]. Важно, что в результате катакластического тренда эволюции создаются условия, благоприятные для развития дизъюнктивной трещиноватости и проникновения в горные породы гидротермальных растворов, а в результате милонитового тренда — условия истирания и динамической «автодиспергации» пород [9], благоприятные для аморфизации и плавления последних, т.е. гранитизации.

Опираясь на сказанное как на самые общие геологические условия для постановки задачи выделения потенциально рудовмещающих уплотненных блоков горных пород, поставим вопрос, как решить эту задачу с помощью гравиметрии. Традиционный подход с применением теории гравитационного потенциала малоэффективен. Действительно, обладая даже избытком горно-буровой информации, можно создать правдоподобную модель одного, двух или большего числа геологических тел. Однако таким способом сложно задать конфигурацию расположения крупных неоднородностей земной коры и направлений тектонических взаимодействий между ними, а значит, сложно смоделировать места динамического уплотнения–разуплотнения горных пород. Такие места нужно как-то «увидеть».

Для решения поставленной задачи целесообразно отказаться от представления об исключительно потенциальной природе аномального гравитационного поля, приняв более общую, в указанном выше смысле, формулировку, включающую и термодинамические факторы состояния вещества. Кроме того, целесообразно вернуться к морфологическому подходу при обработке и интерпретации геофизических полей, позволяющему существенно увеличить объем информации о структуре поля уже на начальных этапах его «визуального» изучения.

В качестве первого шага в направлении решения поставленной задачи предпринята попытка анализа пространственной корреляции между положительными аномалиями гравитационного поля и размещением объектов коренной золоторудной минерализации в пределах заангарской части

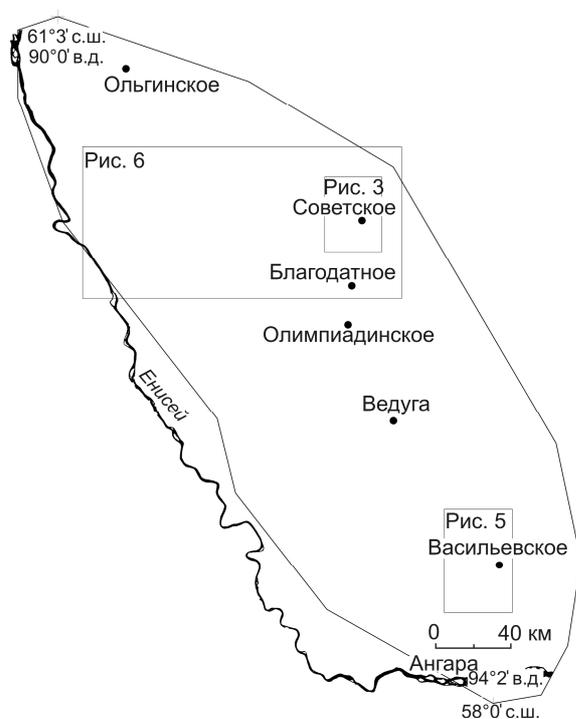


Рис. 1. Контур изученной площади Енисейского кряжа с некоторыми золоторудными объектами и контурами следующих по тексту рисунков

Енисейской золоторудной провинции (рис. 1). Всего рассмотрены 562 объекта, представляющие собой месторождения, рудопроявления и пункты минерализации золота, собранные в единую базу данных [6]. Аномальное гравитационное поле в редукции Буге изучено по карте м-ба 1:200 000. Матрица поля 1000×1000 м получена из всероссийской базы геофизических данных «Гравимаг» (г. Санкт-Петербург).

Полагая, что природа аномального гравитационного поля складчатых областей лишь отчасти связана с потенциальными полями компактных масс (магматических интрузий, надвиговых пластин, блоков фундамента или мантии) и в большей мере определяется процессами метаморфогенного уплотнения пород при их пространственно ориентированном тектоническом взаимодействии, автор встал перед необходимостью разработки высокочувствительного метода азимутального анализа гравитационного поля.

Как известно, азимут простирания — главный атрибут пространственно ориентированных объектов и в графической трактовке это луч, т.е. объект одномерный. Поэтому при обработке матрицы исходных данных автор намеренно отказался от использования любых двумерных элементов математического анализа (пикселей, кругов, эллипсов и т.п.), а также операций интегрирования внутри таких элементов. Это связано с тем, что интегрирование внутри двумерных элементов с априорно неизвестными весовыми функциями вдоль разных азимутов с неизбежностью приводит к смешению информации в центральной точке таких элементов. В связи с этим нами применялись только дифференциальные процедуры математического анализа вдоль одномерных пространственных элементов — азимутально ориентированных отрезков.

В качестве пространственного элемента для анализа поля на произвольной квадратной сетке выбран азимутально ориентированный отрезок $[c, a, b]$, проходящий через три точки (рис. 2, а). В центральной точке a отрезка введена морфологическая модель, состоящая из трех возможных типов особенностей поля. Особенности экстремального Δ_e^- -типа характеризуют аномалии, выраженные явным образом в виде экстремумов положительного или отрицательного знака. Особенности флексурного Δ_f^- -типа характеризуют аномалии, выраженные неявным образом в виде «флексур» положительного знака. Аномалии этого типа встречаются более часто и, по сути, аналогичны аномалиям первого типа на линейно меняющемся фоне, интенсивность изменения которого можно оценить с помощью особенностей градиентного Δ_g^- -типа. Последова-

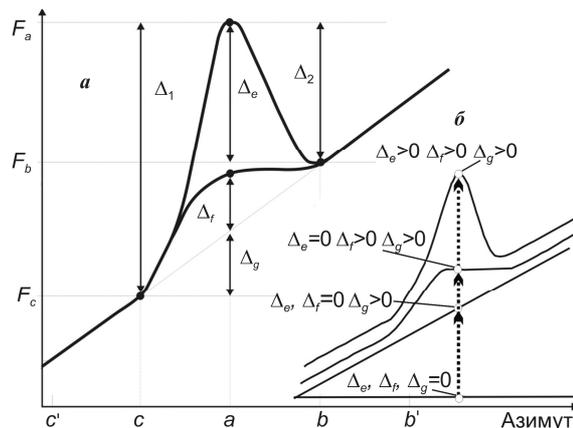


Рис. 2. Математическая модель поля (а) и последовательность усложнения его морфологии (б):

обозначения см. в тексте

тельность усложнения морфологической структуры поля любой природы приведена на рис. 2, б.

Формулы, с помощью которых можно рассчитать морфологические особенности поля указанных типов, представляют собой математические операции над двумя конечными разностями — «встречными дифференциалами» Δ_1 и Δ_2 . Например, при выделении особенностей Δ_e^- , Δ_f^- и Δ_g^- -типов в окрестности $[b, c]$ точки a алгоритм расчета следующий:

$$1. \Delta_1 = F_a - F_c \text{ и } \Delta_2 = F_a - F_b.$$

2. Если $\Delta_1 \cdot \Delta_2 > 0$ и $\Delta_1 > 0$, то $\Delta_e^+ = \min(\Delta_1; \Delta_2)$ — «положительные аномалии Δ_e^- -типа».

3. Если $\Delta_1 \cdot \Delta_2 > 0$ и $\Delta_1 < 0$, то $\Delta_e^- = \max(\Delta_1; \Delta_2)$ — «отрицательные аномалии Δ_e^- -типа».

4. Если $\Delta_1 \cdot \Delta_2 < 0$, то

$$\Delta_f^+ = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$$

(анализируются положительные аномалии Δ_f^+ -типа).

$$5. \Delta_g = \frac{|\Delta_1 - \Delta_2|}{2n}$$

В этих формулах явно или неявно используется натуральное число n , характеризующее порядок окружения центральной точки a . Так, b и c образуют первый порядок окружения точки a , точки b' и c' — второй и т.д. (см. рис. 2, а). Введение порядка окружения позволяет в ходе последовательной процедуры разложения выделять особенности Δ_e^- , Δ_f^- и Δ_g^- -типов разной пространственной частоты, т.е. проводить частотный анализ поля в пространственной области. При этом выделяемые аномалии характеризуют изменчивость поля в направлении одно-

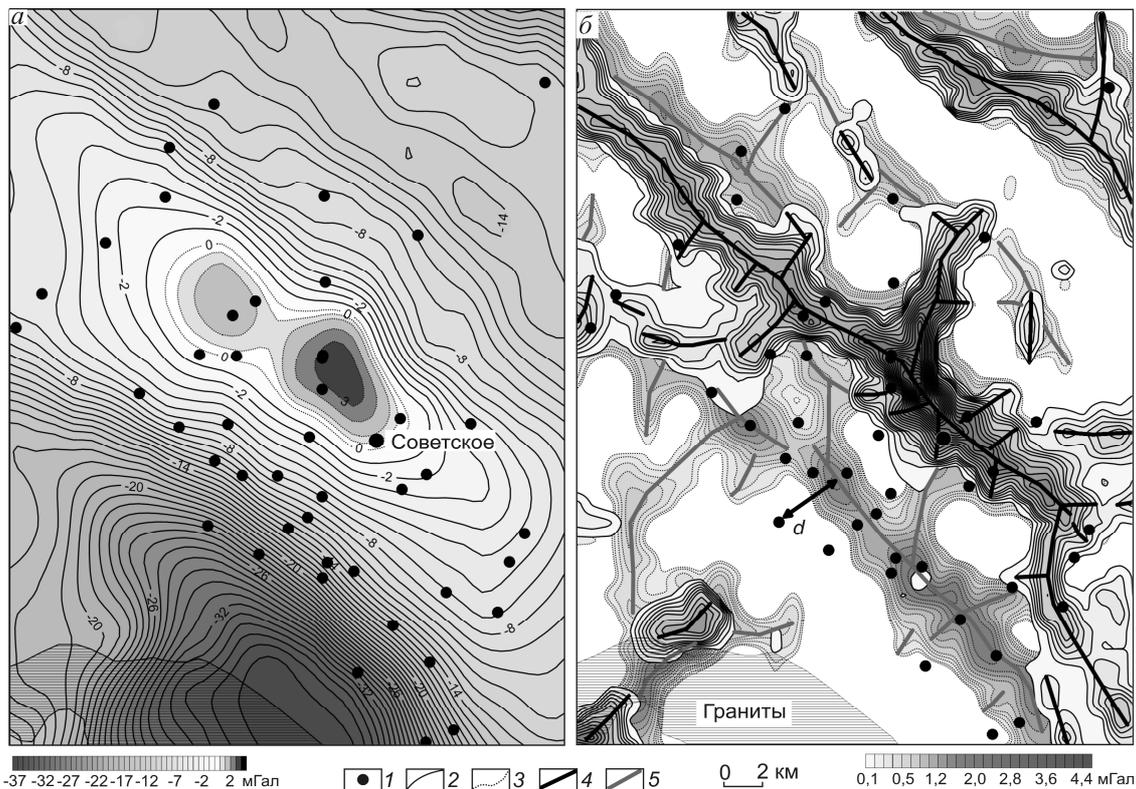


Рис. 3. Фрагмент исходного гравитационного поля в пределах Советско-Перевальненского рудного узла (а), положительные аномалии разных типов (б):

l — золоторудные объекты; положительные аномалии: 2 — Δ_e -типа, 3 — Δ_f -типа; оси аномалий: 4 — Δ_e -типа, 5 — Δ_f -типа; d — удаленность золоторудного объекта от оси аномалии

значно заданных азимутально ориентированных отрезков $[c, a, b]$, $[c', a, b']$ и т.д. Число доступных азимутов анализа увеличивается всякий раз на 4 при переходе к следующему порядку окружения центральной точки.

В результате разработанный на основе «встречных дифференциалов» метод частотно-азимутального анализа позволил осуществить разложение гравитационного поля во всем диапазоне доступных азимутов и пространственных частот и сформировать множество отдельных слоев для трех типов морфологических особенностей (например, для $n=1$ количество независимых слоев информации равно 12). Обратный синтез слоев в той или иной комбинации позволяет ставить и решать раз-

ные геологические задачи, связанные, прежде всего, с изучением азимутально ориентированных геологических объектов и процессов.

Так, в отношении гравитационного поля изученной нами части Енисейского кряжа рассчитаны положительные аномалии Δ_e - и Δ_f -типов для $n=1$ (по азимутам 0, 45, 90, 135°) и $n=2$ (по азимутам 0, 27, 45, 63, 90, 117, 135, 153°). Далее, для $n=1$ и $n=2$ в каждом узле сетки были рассчитаны поля-суперпозиции $\text{sup}\Delta_{n=1e}$, $\text{sup}\Delta_{n=2e}$, $\text{sup}\Delta_{n=1f}$, $\text{sup}\Delta_{n=2f}$; представляющие собой максимальные по модулю значения аномалий Δ_e - и Δ_f -типов, перебираемых по всем доступным азимутам. Полученные поля-суперпозиции попарно суммированы: $\text{sum}\Delta_{n=1-2e} =$

¹ Автор обращает внимание на два момента. Во-первых, отрицательный знак исходного поля не исключает возможности выделения из этого поля более локальных аномалий положительного знака. Во-вторых, поскольку отрицательные значения локальных гравитационных аномалий Δ_e -типа в статье не рассматриваются, на рисунок они не выносились, и далее речь идет о положительных локальных аномалиях гравитационного поля.

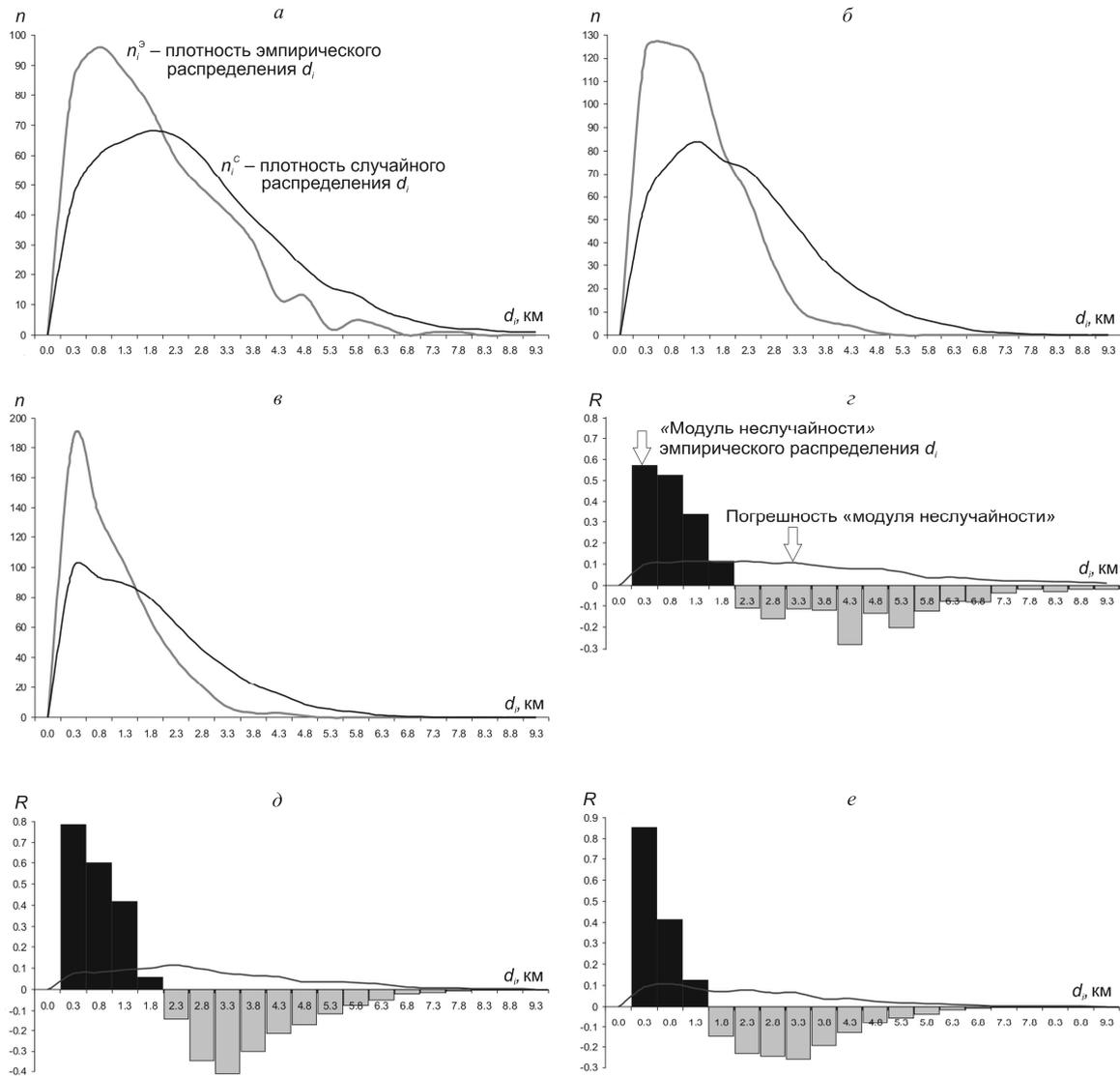


Рис. 4. Эмпирическая функция плотности распределения параметра d (и ее случайный аналог) и оценка степени совпадения эмпирического распределения с его случайным аналогом для аномалий типа:

a — Δ_e ; $б$ — Δ_f ; $в$ — Δ_e или Δ_f ; $г$ — Δ_e ; $д$ — Δ_f ; $е$ — Δ_e или Δ_f

$\sup\Delta_{n=1e} + \sup\Delta_{n=2e}$ и $\sum\Delta_{n=1-2f} = \sup\Delta_{n=1f} + \sup\Delta_{n=2f}$. Таким образом, в пределах изученной площади были выделены две группы высокочастотных (локализованных в радиусе не более 2 км от центра азимутально ориентированного отрезка) положительных аномалий гравитационного поля Δ_e - и Δ_f -типов. В качестве примера приведен фрагмент исходного гравитационного поля в пределах Советско-Перевальненского золоторудного узла (рис. 3, a), а также результат его частотно-азимутального анализа (см. рис. 3, $б$)¹.

Для выявления пространственной корреляции золоторудных объектов с положительными анома-

лиями гравитационного поля применен метод прямого статистического анализа удаленности точечных объектов от осей аномалий. Суть его заключается в расчете и сопоставлении эмпирической функции удаленности с ее случайным аналогом.

Первый этап состоял в оценке удаленности d (км) каждого золоторудного объекта от оси ближайшей к ней гравитационной аномалии Δ_e - и (или) Δ_f -типа (см. рис. 3, $б$) и построении соответствующих эмпирических функций плотности распределения величины d (рис. 4), где i — номер интервала группирования d . Общая форма графика такой функции, очевидно, определяется пространственной

плотностью гравитационных аномалий в области исследования. И поскольку пространственная структура аномального гравитационного поля устойчива во времени, можно полагать, что для каждого из двух типов аномалий (см. рис. 4, а, б), а также их суперпозиции (см. рис. 4, в) эмпирическая функция плотности распределения величины d является единственной.

На втором этапе массив из 562 точечных объектов 30 раз случайным образом «вбрасывался» в пределы контура исследуемой территории, и для каждой реализации по аналогичной процедуре рассчитывалась случайная функция плотности распределения n_i^c величины d . Средняя величина

$$\overline{n_i^c}$$

из 30 случайных реализаций рассматривалась нами как случайный аналог эмпирической функции плотности распределения величины d . Совпадение эмпирической функции плотности распределения с ее случайным аналогом свидетельствует о случайном характере распределения величины d и, следовательно, об отсутствии пространственной корреляции между осями гравитационных аномалий и золоторудными объектами. В противном случае, если плотность эмпирического распределения величины d относительно ее случайного аналога смещается в сторону меньших d , то это указывает на неслучайный характер пространственного распределения золоторудных объектов относительно осей гравитационных аномалий. Степень совпадения эмпирического распределения величины d с его случайным аналогом оценивалась при помощи «модуля неслучайности» R_i^c :

$$R_i^c = \frac{n_i^c - \overline{n_i^c}}{\max |n_i^c|}, \text{ где}$$

$\max |n_i^c|$ — максимальная частота среднего случайного распределения величины d . Погрешность определения модуля R оценивалась величиной среднеквадратического отклонения 30 случайных значений R_i^c от их среднего

$$\overline{R_i^c}, \text{ где}$$

$$R_i^c = \frac{n_i^c - \overline{n_i^c}}{\max |n_i^c|}.$$

Результаты проведенного исследования можно свести к следующим констатациям:

оси положительных гравитационных аномалий Δ_f -типа нередко являются продолжением по простиранию аномалий Δ_e -типа (см. рис. 3, б) и наоборот, что позволяет говорить об единой природе этих двух (различных только морфологиче-

ски) типов аномалий и изучать их совместно (см. рис. 4, в);

для золоторудных объектов заангарской части Енисейского кряжа установлен неслучайный характер корреляции с гравитационным полем. Объекты коренной золоторудной минерализации пространственно тяготеют к осевым частям локальных положительных аномалий гравитационного поля, причем максимум моды распределения «модуля неслучайности» приходится на $d=0,3$ км, а 75% всех объектов находятся не далее 1,3 км от оси ближайшей к ним аномалии Δ_e - или Δ_f -типа (см. рис. 4, е);

в абсолютном выражении число золоторудных объектов, находящихся на удалении $<1,8$ км от осей аномалий Δ_e -типа, составляет 345, а от осей аномалий Δ_f -типа — 450 объектов. Это позволяет считать важным сам факт выделения гравитационных аномалий «флексурного» типа для более полного изучения гравитационного поля Енисейского кряжа.

Практическая значимость выполненного исследования во многом зависит от понимания геологической природы выявленных положительных гравитационных аномалий. Непосредственная причина последних, конечно, ясна, и связана она с положительной величиной избыточной плотности горных пород. Тем не менее, в силу многофакторности этого фундаментального физического свойства можно рассматривать сразу несколько геологических причин, с разной степенью вероятности связывающих локальные положительные гравитационные аномалии и процессы, благоприятные для развития золоторудной минерализации. Назовем некоторые из них.

Базальтовый магматизм, привносящий вместе с пластовыми и секущими телами долерито-базальтов в горные породы верхней части земной коры надкларковые концентрации золота. Последующий регрессивный метаморфизм таких тел на фоне прогрессивного метаморфизма вмещающих их пород приводит в конце концов к формированию плотных тел ортоамфиболитов в раме метаморфических сланцев. Полициклическая гидротермально-метасоматическая «переработка» вещества таких «архаичных базальтов» может служить источником золота для гидротермальных месторождений.

Для Енисейского кряжа, сложенного древними глубоко преобразованными породами, весьма трудно доказать или опровергнуть приемлемость такой модели. Однако всестороннее изучение золотоносности примыкающих с северо-востока к кряжу трапповых полей Сибирской платформы могло бы усилить или ослабить эту модель дополнительными аргументами.

Следует добавить, что высказанная модель не принадлежит автору статьи и поддерживается ведущими геологами, работающими на кряже.

Базификация горных пород при региональном метаморфизме глинистых или доломито-глинистых отложений. В результате этого процесса при поступлении магния и железа из некомпетентных глинистых пород, залегающих в крыльях складок, в шарниры в условиях повышающейся температуры и потери воды образуются параамфиболиты железо-магниевого состава [3]. Зональное уплотнение горных пород по такому механизму может быть важным подготовительным этапом формирования механически жестких блоков, благоприятных для фокусированного проникновения гидротермальных растворов в более поздние коллизионные этапы эволюции Енисейского кряжа.

Метасоматическая базификация горных пород под действием мантийных флюидов. В результате этого процесса во фронтальных частях единой метасоматической колонны, центр которой образуют области гранитизации, формируются зоны первичной базификации горных пород, связанные с их дегидратацией, амфиболитизацией и скарнированием [4]. Полициклическая эволюция таких колонн приводит к более позднему проникновению рудоносных растворов в ранее подготовленные, метасоматически уплотненные, блоки горных пород.

Присутствие меланократовых пород по периферии очагов гранитизации явление достаточно универсальное [10]. В качестве иллюстрации на рис. 5 приведена карта локальных гравитационных

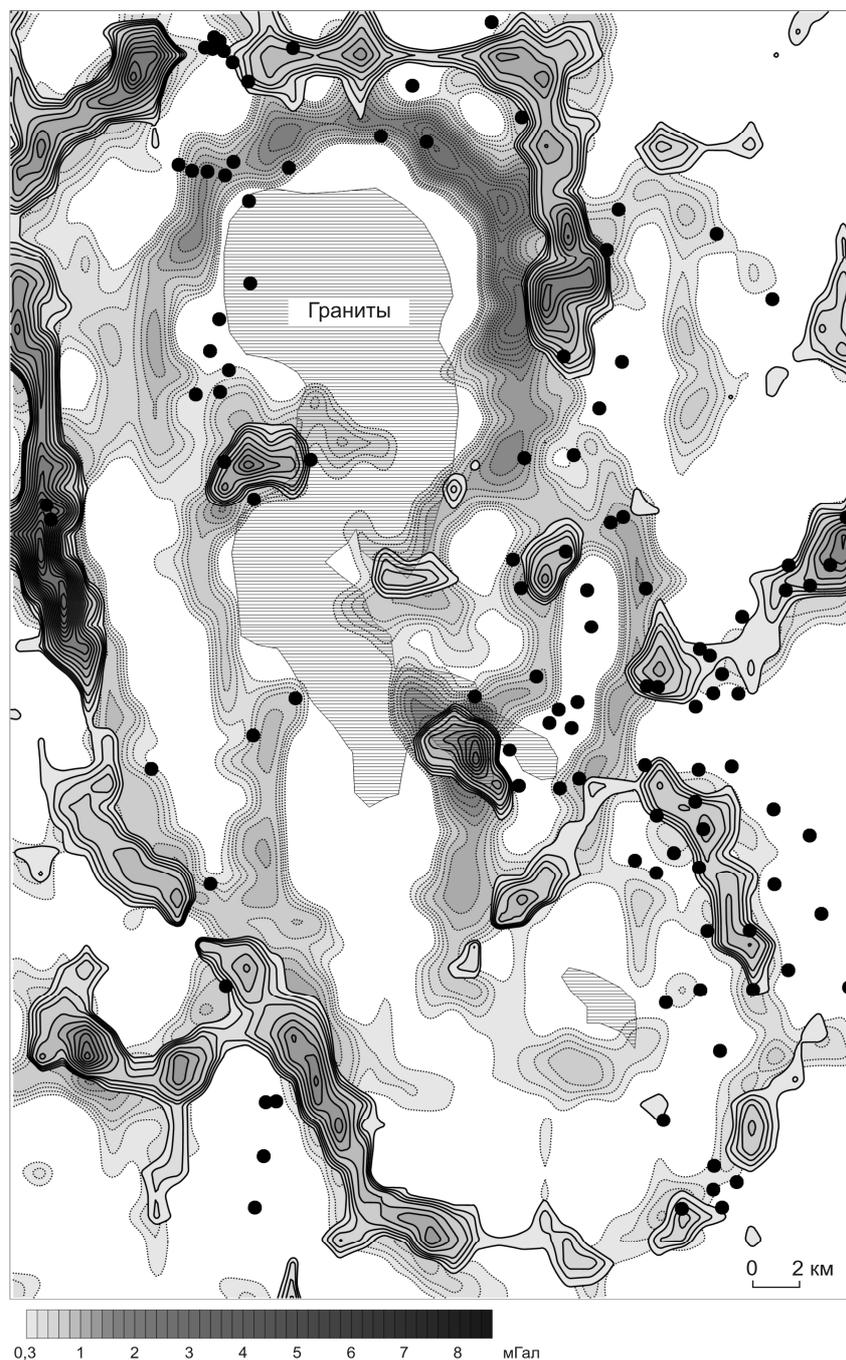


Рис. 5. Структура локальных гравитационных аномалий вокруг Татарского гранитного массива (горизонтальная штриховка):

усл. обозн. см. рис. 3

аномалий вокруг Татарского гранитного массива, залегающего в амфиболитовых сланцах пенченгинской свиты в юго-восточной части Енисейского кряжа. Хорошо проявленный конформизм пространственной структуры положительных гравитационных аномалий и контурных линий гранитного

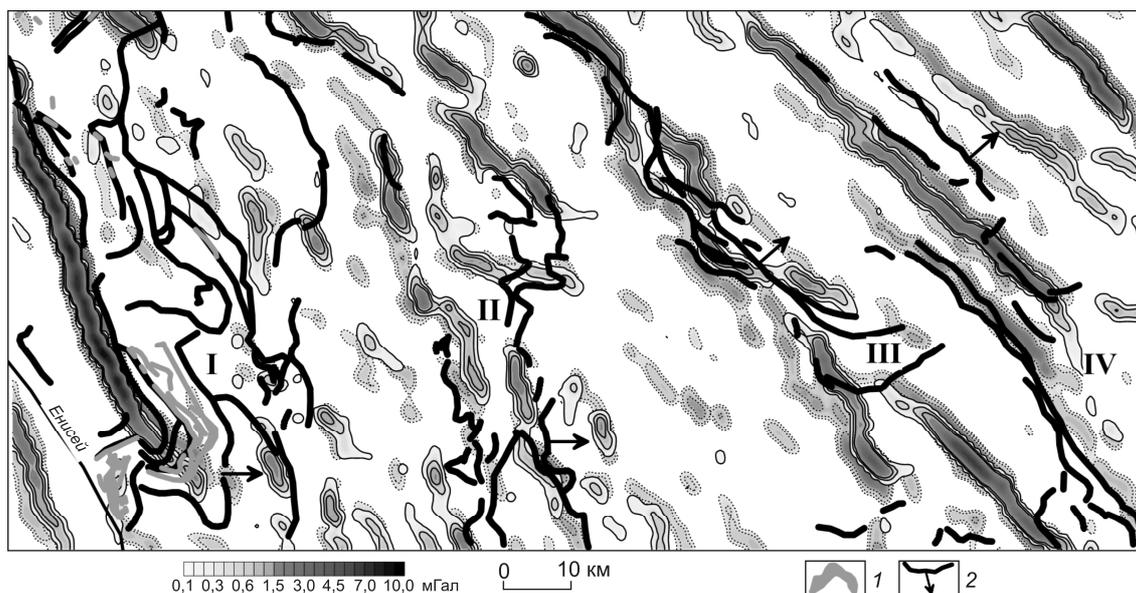


Рис. 6. Структура локальных гравитационных аномалий, выделенных в направлении азимута 45° , т.е. вдоль генерального простирания структур Енисейского кряжа:

1 — тела и дайки ультрабазитов сурнихинского комплекса; 2 — линии и направление надвигов; остальные усл. обозн. см. рис. 3

массива свидетельствует о возможной парагенетической связи между этими объектами. С другой стороны, положительные аномалии гравитационного поля можно связывать и с поясами амфиболитов, развитых к западу, северу и востоку от массива. Правда, масштаб использованных гравиметрических данных не позволяет с полной уверенностью говорить о существовании такой связи.

Сеймотектоническое упрочнение горных пород при их сдавливании в зонах непосредственного контакта висячего и лежачего бортов крутопадающих тектонических нарушений (на участках выклинивания глинок трения), а также в зонах скопления перемещенных и сгруженных включений (порфирокластов) [13].

Важно то, что механическое упрочнение горных пород в зонах скопления порфирокластов может развиваться как вдоль плоскостей крутопадающих разломов взбросо-сдвиговой кинематики, так и вдоль разломов с пологопадающими плоскостями — надвигов. Механизм формирования многочешуйчатой, дуплексной структуры типичного надвига предполагает наличие в его фронтальной части круто наклоненного участка относительно плотных пород [1]. Поскольку в самом начале процесса надвигания из двух соседних пород в механическое движение приходят наименее компетентные, упрочнение пород на фронте надвига — свой-

ство, вероятно, приобретенное. С точки зрения геофизики примечательно то, что на завершающих этапах тектонического скучивания горных пород в местах их «заторов» создаются условия, необходимые для преобразования самого способа передачи механического напряжения из «близкодействующего», контактного, в более «дальнодействующий», сейсмический. При этом эффективность, направление и дальность передачи энергии сейсмическими волнами будут зависеть от пространственной геометрии и характера связности зон тектонически уплотненных горных пород.

В настоящее время интерес к надвигам велик. В отношении Енисейского кряжа активно разрабатывается новая генетическая модель коренной золотоносности, исходным пунктом которой является надвиговая тектоника [5]. Согласно этой модели, плоскости надвигов играют роль тектонических экранов на пути восходящей миграции эндогенных флюидов по зонам субвертикальных глубинных разломов. Энергетическим источником надвигов был процесс субдукции океанической коры с запада под Сибирскую платформу в коллизионный этап эволюции ее западных окраин 720–750 млн. лет назад. Геологический след той коры — протяженные тела гипербазитов сурнихинского комплекса, вытянутые вдоль р. Енисей в северо-западной части кряжа. На рис. 6 проиллюстрирована степень про-

странственной корреляции тектонических нарушений, закартированных в ранге надвигов с преимущественно западным падением плоскости сместителя (по данным современной геологической карты м-ба 1:200 000), и осевых частей локальных положительных аномалий гравитационного поля, закартированных при азимуте анализа поля 45° , т.е. вдоль генерального северо-западного простираня структур Енисейского кряжа. Показаны значения сумм первых трех частот ($n=1, 2, 3$) аномалий Δ_e - и Δ_f -типа, рассчитанные только по азимуту анализа поля 45° и обозначенные, аналогично таковым на рис. 3. Пространственное распределение и линий надвигов, и положительных гравитационных аномалий имеет полосовой характер (полосы I, II, III и IV) (см. рис. 6). Пространственная анизотропия и пространственная корреляция гравитационных аномалий и линий надвигов постепенно усиливаются в восточном направлении от предполагаемого источника надвигов. Приведенная иллюстрация указывает на перспективность частотно-азимутального анализа структуры гравитационного поля для расшифровки тектонической части истории золотоносности Енисейского кряжа.

Гидрогенное уплотнение горных пород в зонах щелочного метасоматоза. Причины уплотнения горных пород в этом геохимическом процессе не столь очевидны (возможно, спорны), поскольку связаны не с «утяжелением» состава горных пород за счет привноса сидерофильных элементов, а с заполнением пор сравнительно «легкими» элементами, такими как Si и K. Например, средняя общая пористость 3,9% вмещающих метаалевролитов Мурунтауского рудного поля после насыщения их кварцем и полевыми шпатами уменьшилась в два раза (до 1,9%), сформировав своеобразные зоны «ороговикования». За счет привноса K, Si и местного перераспределения Fe (формирование полосчатых текстур за счет реститового биотита) в таких зонах произошло осветление пород. В итоге последние приобрели «плотное массивное сложение и повышенную хрупкость, которые, в свою очередь, обеспечивают максимально благоприятные условия для активного развития трещиноватости и локализации именно в этих породах кварцево-жильного штокверка» [6].

Для Енисейского кряжа развитие золоторудной минерализации в матаалевролитах — процесс ред-

кий. Вместе с тем наложение низкотемпературного кремнещелочного метасоматоза на изначально катаклазированные породы, независимо от их состава и степени метаморфизма, должно приводить к аналогичному результату — незначительному гидрогенному уменьшению их пористости, т.е. уплотнению.

Недостаточная детальность исходной гравитационной карты и отсутствие сопоставимых по масштабу геологических карт наложенных изменений пород Енисейского кряжа не позволяют автору ранжировать рассмотренные причины по степени их влияния на установленную корреляцию гравитационного поля и золоторудных объектов. Тем не менее, в качестве логического завершения обсуждения результатов расставим их в следующем порядке. Базальтовый магматизм доколлизийных (дорифейских) этапов развития западных окраин Сибирской платформы мог сформировать (аналогично сибирским траппам) внутренний долерито-базальтовый каркас пород осадочного чехла, послуживший механически жесткой основой для будущей эволюции складчатой области. Параллельно, в том же временном интервале, региональный метаморфизм преобразовал часть глинистых и доломито-глинистых отложений в уплотненные зоны параамфиболитов. Сейсмоструктурное упрочнение горных пород в коллизийный этап истории Енисейского кряжа можно считать ведущим процессом, заложившим общий структурный план кряжа и, как следствие, конфигурацию его гравитационного поля и зональность размещения золоторудных объектов. Метасоматическая базификация вокруг очагов гранитизации, а также гидрогенное уплотнение горных пород в удаленных от таких очагов зонах катаклаза и милонитизации обусловили формирование локальных структур узлов золотоносности, представляющих наибольший практический интерес.

Установленная положительная корреляция пространственного размещения объектов золоторудной минерализации Енисейского кряжа и локальных положительных аномалий гравитационного поля, вероятно, не является чем-то новым¹. Однако метод, которым эта корреляция установлена, а также прямое картирование ранее не выделяемых аномалий «флексурного типа» позволяют существенно расширить интерпретационные возможности

¹ В объяснительной записке к государственной геологической карте м-ба 1:200 000 (лист Р-46-XXXIII) констатируется, что «участки развития бластомилонитов и метасоматически измененных пород кординской свиты» (одной из главных золотоносных свит Енисейского кряжа) «выделяются локальными максимумами гравитационного поля, связанными с увеличением плотности пород до $2,76 \pm 2,80 \text{ г/см}^3$ » [2].

гравиметрии. Особенность и конечная цель принятого «морфологического подхода» состоят в попытке уйти от типичных для гравиметрии модельных расчетов глубин залегания компактных геологических объектов (интрузий, надвиговых пластин и т.д.) и приблизиться к прогнозированию рудоконтролирующих структур, а точнее, к созданию объективной геофизической основы для такого прогнозирования.

Оценить практическую значимость полученного единичного результата можно, проверив предложенный подход в других золоторудных провинциях. В случае положительного исхода гравиметрическая информация (например, в базе данных «Гравимаг») может использоваться в качестве геофизической основы:

прогнозирования золоторудных структур на флангах известных рудных узлов;

разработки и внедрения более эффективных геофизических и геохимических технологий поисков, опирающихся при «прощупывании» перспективных гравитационных структур на более экономичные профильные работы с применением комплексов глубинных работ (например, комплекса электроразведки СГ-ВП с гидро- или литобиогеохимией);

генерации новых металлогенических идей в старых хорошо изученных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геодинамические* исследования при геологической съемке. Методические рекомендации / В.Н.Зелепугин, В.Ф.Николаев, В.Д.Вознесенский и др. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1992.
2. *Государственная* геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000. Сер. Енисейская, лист Р-46-XXXIII. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2008.
3. *Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. Т. 2. Цепочечные силикаты. – М.: Мир, 1965.
4. *Жданов В.В.* Метасоматиты, опыт изучения и картирования. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.
5. *Исаковский* террейн и его обрамление / А.А.Стороженко, Н.Ф.Васильев, С.Д.Сидорас и др. // Мат-лы научно-практической конференции «Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири». Красноярск, 2010. С. 211–222.
6. *Кременецкий А.А., Лапидус А.В., Скрыбин В.Ю.* Геолого-геохимические методы глубинного прогноза полезных ископаемых (по данным сверхглубокого бурения). – М.: Наука, 1990.
7. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. – М.: Наука, 1988.
8. *Опыт* применения технологии компьютерного прогнозирования золоторудных объектов в заангарской части Енисейского кряжа / В.А.Макаров, С.М.Макеев, В.В.Межубовский и др. // Руды и металлы. 2012. № 3. С. 50–58.
9. *Поспелов Г.Л.* Диспергаты и автодиспергаты как важная проблема физики лито-, петро- и тектогенеза // Геология и геофизика. 1972. № 12. С. 53–73.
10. *Раген Э.* Геология гранита. – М.: Недра, 1979.
11. *Родыгин А.И.* Динамометаморфические породы. – Томск: ТГУ, 2001.
12. *Штокаленко М.Б., Алексеев С.Г.* Вейвлет-преобразования с физическим смыслом // Мат-лы 34-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». М., 2007. С. 293–297.
13. *Miller M.G.* Ductility in fault gouge from a normal fault system, Death Valley, California: A mechanism for fault-zone strengthening and relevance to paleoseismicity // Geology. 1996. Vol. 24. № 7. P. 603–606.