

ПОИСК ДЕФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА ПО ДАННЫМ АЗИМУТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

С.М.Макеев

Институт горного дела, геологии
и геотехнологии СФУ,
г. Красноярск

С учетом обнаруженных ранее протяженных дугообразных структур гравитационного поля Енисейского кряжа и предположения об их тектонической природе сделана попытка найти непосредственное подтверждение тектонического взаимодействия Исаковского террейна и юго-западного края Сибирской платформы. Выполнен азимутальный анализ, в результате которого выявлена дуплексная структура низкочастотных аномалий гравитационного поля. Приведены аргументы в пользу деформационной природы этих аномалий. Установлен ряд пространственных корреляций между ними и основными факторами золотоносности: Ишимбинским региональным надвигом, центром гранитизации, крупнейшими месторождениями. Сделана попытка определить общую для всего кряжа конфигурацию поля упругих деформаций.

Ключевые слова: Енисейский кряж, дугообразные структуры, дуплексная структура аномалий гравитационного поля, граниты, надвиги, упругие деформации, месторождения золота.

В опубликованной ранее статье [8] автор провел анализ пространственного размещения высокочастотных положительных аномалий гравитационного поля Енисейского кряжа, на основе которого была выделена система протяженных (~200 км) дугообразных структур, контролирующая расположение объектов коренной золоторудной минерализации. Предположено, что природа данных структур связана с тектоническим уплотнением горных пород вследствие взаимодействия двух жестких литосферных блоков в направлении вектора силы F , ортогонального дугообразным структурам (рис. 1, а). Поскольку приведенные аргументы носили косвенный характер, возникла мысль найти этому предположению более непосредственное под-

тверждение, что и стало целью настоящей работы.

Согласно современной тектонической модели, складчатая структура Енисейского кряжа возникла в результате надвигания Исаковского террейна на юго-западный край Сибирской платформы [6]. Если, вслед за авторами этой идеи, допустить, что такое движение действительно происходило и зажатая между двумя тектоническими блоками складчатая область Енисейского кряжа транслировала движение, то в структуре гравитационного поля кряжа могли остаться специфичные аномалии, связанные с перераспределением плотности горных пород в процессе их адаптации к значительному тектоническому стрессу. Азимуты направлений, в ко-

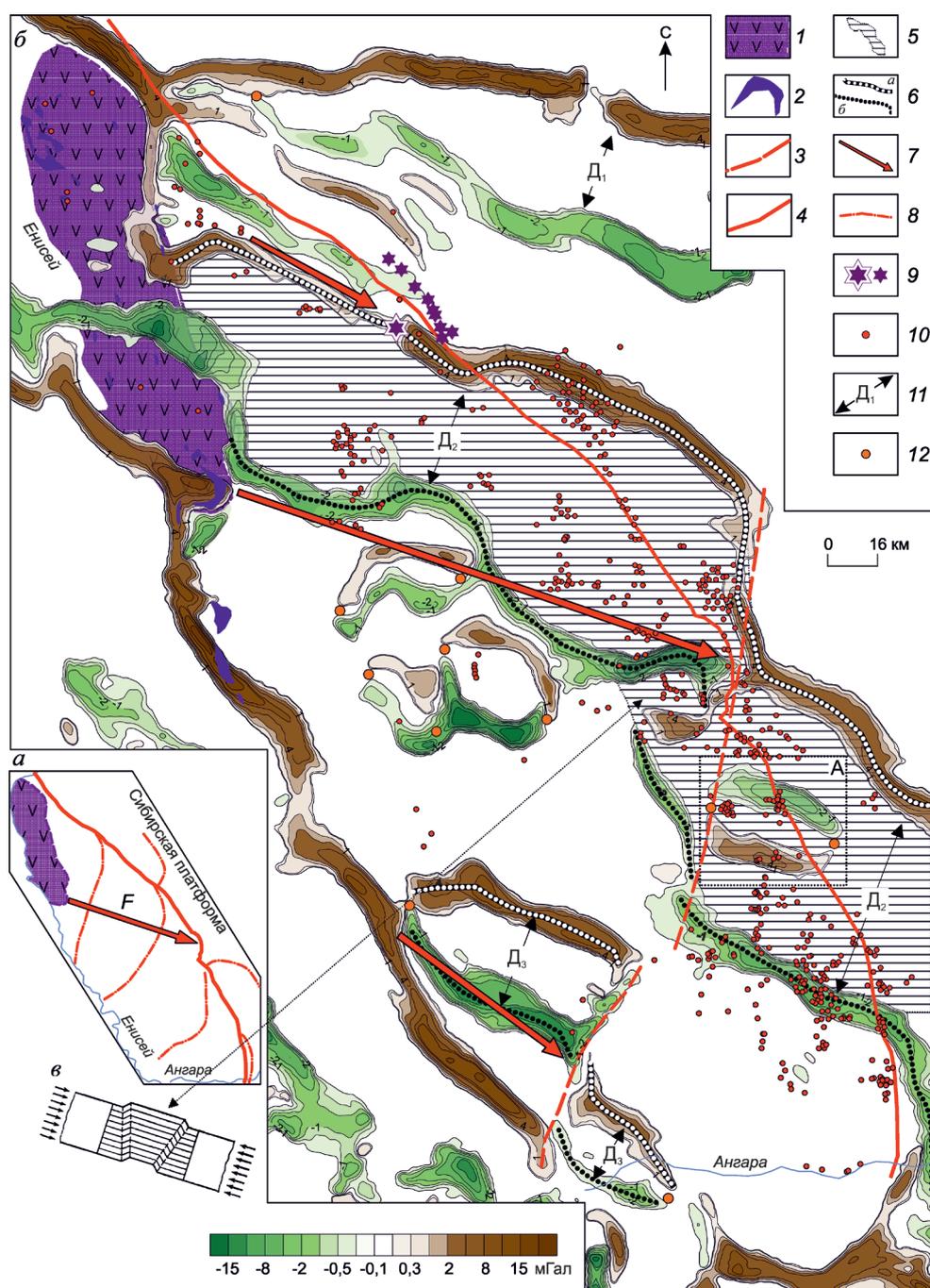


Рис. 1. Дугообразные структуры (а), низкочастотные аномалии гравитационного поля Енисейского кряжа, выделенные в диапазоне азимутов 95–125° (б), модель складки-излома (в):

1 – Исаковский террейн; 2 – гипербазиты сурнихинского комплекса, R_{1-2} ; 3 – субмеридиональное нарушение структуры гравитационного поля (гравиструктурное нарушение); 4 – Ишимбинский глубинный разлом; 5 – область золотоносности Енисейского кряжа; 6 – осевые линии положительной (а) и отрицательной (б) аномалий гравитационных дуплексов D_2 и D_3 ; 7 – главные направления тектонического взаимодействия жестких блоков; 8 – осевые линии дугообразных структур; 9 – крупный шток и трубки щелочных пикритов чапинского комплекса (V_1); 10 – объекты коренной золоторудной минерализации; 11 – гравитационные дуплексы; 12 – точки сопряжения положительной и отрицательной ветвей дуплекса; остальные усл. обозн. см. в тексте

торых можно выявить подобные аномалии, очевидно, связаны с направлением вектора силы F .

Попытка прямого расчета аномального гравитационного эффекта от столь масштабного явления, как взаимодействие неоднородных литосферных блоков, кажется преждевременной по двум причинам. Во-первых, следует обратить внимание на важное замечание авторов 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 поля. 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]. Получается, что исходя из теории гравитационного потенциала знание термодинамических условий формирования геологических масс не является существенным требованием. Но это не означает, что такие условия в реальности не влияют на величину и пространственную структуру гравитационного поля масс. Сама идея традиционного подхода к интерпретации данных гравиметрии не учитывает возможности извлечения информации о термодинамической истории геологических масс, так как эта возможность изначально не заложена в теорию гравитационного потенциала. Во-вторых, предварительный расчет гравитационного эффекта от рассматриваемого явления должен опираться на качественно непротиворечивую геологическую модель взаимодействия жестких блоков в частных, региональных, условиях Енисейского кряжа, учитывающих первичный литолого-химический состав пород и последующее динамотермальное преобразование их в результате тектонического взаимодействия. При отсутствии подобной модели, своеобразного аналога цитированного выше «уравнения состояния вещества», расчеты поля могут создать лишь

видимость основания для рассуждения, таковым не являясь.

Исходя из этих двух замечаний, автор выбрал путь морфологического анализа структуры гравитационного поля с последующей корреляцией результатов с понятными ему элементами геологической карты Енисейского кряжа.

Частотно-азимутальный метод, с помощью которого выполнен морфологический анализ гравитационного поля, подробно изложен в работе [9]. Не повторяя всего, заметим, что азимут простираения – один из главных атрибутов пространственно ориентированных объектов и в графической трактовке представляет луч, т.е. одномерный элемент анализа. Поэтому при обработке матрицы исходных данных (в нашем случае матрица 1x1 км) намеренно отказались от использования любых двумерных элементов анализа (пикселей, кругов, ориентированных эллипсов и т.п.), а также операций интегрирования внутри таких элементов. Связано это с тем, что интегрирование внутри двумерных элементов с априорно неизвестными весовыми функциями вдоль разных азимутов неизбежно приводит к смешению информации в центральной точке элементов, а значит, к искажению азимутальной дисперсии изучаемого поля в этой точке. Последнее особенно существенно при анализе низкочастотных (относительно «глубинных») составляющих поля и приводит к известному «расплыванию» аномалий по мере уменьшения их пространственной частоты. В связи с этим в частотно-азимутальном методе применены только дифференциальные процедуры математической обработки данных вдоль одномерных пространственных элементов – азимутально ориентированных отрезков (рис. 2). Отличительная особенность метода состоит в том, что он позволяет разложить исходное поле (представленное в нашем случае картой аномального гравитационного поля в редукции Буге м-ба 1:200 000) на отдельные карты-слои, различающиеся азимутом (определяемым направлением азимутально ориентированного отрезка) и пространственной частотой (определяемой длиной азимутально ориентированного отрезка) выделяемых составляющих поля. Обратный синтез карт-слоев в той или иной комбинации поз-

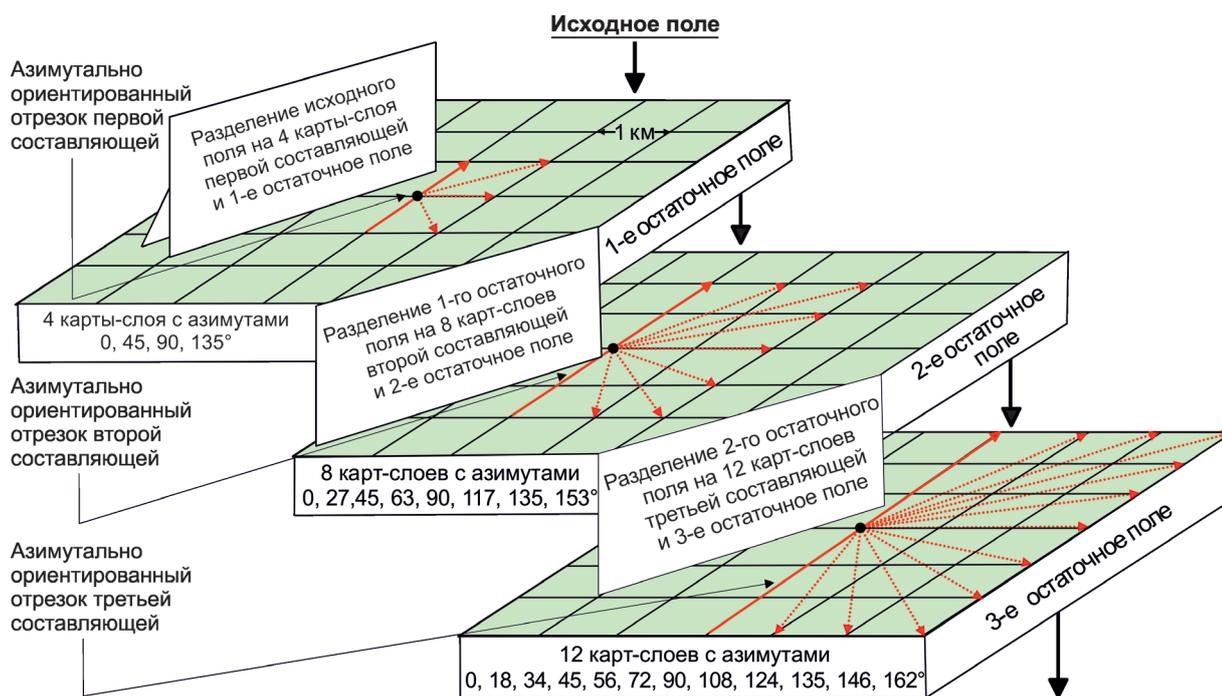


Рис. 2. Принципиальная схема частотно-азимутального анализа до третьей составляющей включительно в отдельно взятом узле квадратной сети 1х1 км

воляет ставить и решать разные геологические задачи, связанные прежде всего с изучением азимутально ориентированных геологических объектов и процессов.

Возвращаясь к цели настоящей работы, первая задача заключалась в выборе частотного спектра и азимутов гравитационных аномалий, которые бы лучшим образом отражали особенности предполагаемой деформации Енисейского кряжа при тектоническом взаимодействии Исаковского террейна и юго-западного края Сибирской платформы. Выбор был сделан по аналогии, по литературным данным, основываясь на экспериментальных исследованиях процесса деформирования высокопрочных вязкоупругих тел. В работах [11, 12] испытывались образцы интерметаллических соединений, нагружаемых по схеме одноосного сжатия вплоть до их разрушения. Подобные исследования проводятся в рамках методологии физической мезомеханики. В этом современном разделе физики твердого тела изучают пластическое течение в нагруженном твердом теле на трех (микро-, мезо- и макромасштабном) уровнях, справедливо

полагая, что описать физическую природу всей иерархии масштабных уровней локализации пластических деформаций в твердом теле на основе только одноуровневого подхода теории дислокаций не представляется возможным. Авторами работ отмечены следующие закономерности процесса деформирования твердых тел.

1. Практически с самого начала нагружения образца уже на микромасштабном уровне в различных областях его поверхности возникают отдельные продольные складки конечной длины, значительно превышающие размер зерен слагающих образец кристаллитов. По мере увеличения внешней нагрузки число продольных складок возрастает, их ширина составляет 3–5% от продольного размера образца, а длина достигает размеров, сопоставимых с его длиной. Отмечается, что протяженные продольные складки начинаются преимущественно около точек приложения силы и распространяются к центру образца. Изображение продольных складок, полученное с помощью электронного микроскопа в самые первые моменты нагружения, показано на рис. 3, а.

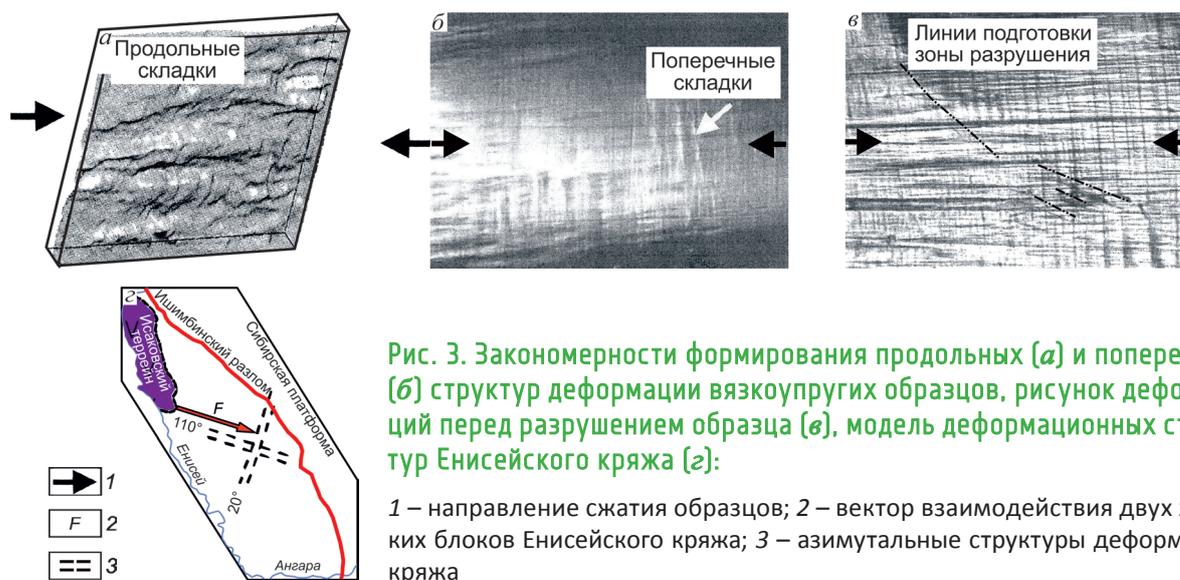


Рис. 3. Закономерности формирования продольных (а) и поперечных (б) структур деформации вязкоупругих образцов, рисунок деформаций перед разрушением образца (в), модель деформационных структур Енисейского кряжа (з):

1 – направление сжатия образцов; 2 – вектор взаимодействия двух жестких блоков Енисейского кряжа; 3 – азимутальные структуры деформации кряжа

2. Дальнейшее формоизменение образца происходит при нарастании внешней нагрузки и обусловлено развитием деформаций мезомасштабного уровня. Их особенность – появление на поверхности образца поперечных (вектору силы) складок (см. рис. 3, б), локализирующих не только пластические деформации материала, но и участки его вихревого движения, приводящего к фрагментации образца на области с хаотизацией направлений смещения отдельных кристаллитов.

3. Перед разрушением образец теряет сдвиговую устойчивость и в результате разделяется на два макрофрагмента, движущихся навстречу друг к другу. При этом элементы деформационной структуры, сформировавшиеся в течение всего времени нагружения (продольные и поперечные складки), не исчезают и после разрушения (см. рис. 3, в).

Предположив, что механизм разрушения вязкоупругих образцов твердых тел конечных размеров может на качественном уровне воспроизводиться и в горных породах, занимающих существенно большие объемы пространства*, составили схему ожидаемых азимутов простиранения деформационных макроструктур Енисей-

ского кряжа (см. рис. 3, з). Азимут продольных макроструктур, сонаправленных вектору F , определен как 110° , поперечных, ортогональных вектору F , – 20° . В качестве диапазона длин азимутально ориентированных отрезков выбран диапазон 18–20 км, оптимальный для выявления аномалий шириной $\sim 5\%$ от протяженности кряжа (~ 400 км), играющего роль деформируемого образца.

Предположив также, что деформационные макроструктуры кряжа могут сопровождаться зонами уплотнения и разуплотнения горных пород, задачу настоящей работы свели к построению двух карт низкочастотных аномалий гравитационного поля, проанализированного вдоль и ортогонально направлению вектора F .

Итоговая карта на рис. 1, б построена путем суммирования двух низкочастотных составляющих гравитационного поля, выделенных при анализе, с длинами азимутально ориентированных отрезков 18 и 20 км. Каждая из составляющих предварительно была получена суперпозицией нескольких карт-слоев, различающихся азимутами анализа поля в диапазоне $95\text{--}125^\circ$ ($\pm 15^\circ$ вокруг азимута 110°). Так, при анализе поля по всевозможным (на квадратной сетке) азимутам

* Гипотетичность подобного рода предположений очевидна, однако они широко применяются в геофизике и геомеханике в рамках различных концепций самоподобия разноранговых объектов геологического пространства. Получив свое развитие из гипотезы акад. М.А.Садовского о блочно-иерархическом строении земной коры, эти концепции позволяют использовать результаты смежных научных дисциплин по аналогии.

составляющая с частотой «18 км» получена суперпозицией пяти слоев с азимутами 96, 103, 114, 119 и 124°, а составляющая с частотой «20 км» – семи слоев с азимутами 96, 101, 107, 112, 117, 121 и 125°. Суперпозиция карт-слоев осуществлялась путем присваивания каждому узлу компонуемой карты того значения поля (из того же узла) сравниваемых слоев, которое было максимальным по модулю. Таким образом, карта на рис. 1, б составлена на основе синтеза 12 информативных слоев. Аналогично составлена и карта на рис. 4, с тем лишь отличием, что составляющие с частотами «18 км» и «20 км» получены суперпозицией карт-слоев, различающихся азимутами анализа поля в диапазоне 5–35° ($\pm 15^\circ$ вокруг азимута 20°). Для содержательной интерпретации обе карты дополнены геологической информацией из базы данных, описанной в работе [10].

Анализ построенных карт позволил сделать следующие выводы.

1. Низкочастотные аномалии гравитационного поля Енисейского кряжа, выделенные в диапазонах азимутов 95–125° и 5–35°, имеют дуплексную структуру (англ. duplex structure – сдвоенная, спаренная, двухцепочечная структура) и проявлены главным образом в виде пар сближенных (положительных и отрицательных), сопоставимых по протяженности и интенсивности (от -10 до +10 мГал) аномальных ветвей. Характерная особенность дуплексной структуры гравитационных аномалий – наличие у каждого полностью проявленного в пределах карты дуплекса двух точек сопряжения положительной и отрицательной ветвей (фрагмент «А» на рис. 1, б). Наиболее протяженный (>300 км) гравитационный дуплекс D_2 шириной 40–80 км выделен на карте азимутальной составляющей в диапазоне 95–125° (см. рис. 1, б). Его характерной особенностью является то, что в область между положительной и отрицательной ветвями попадают 90% (из 562) объектов коренной золоторудной минерализации кряжа, вследствие чего всю область, занимаемую гравитационным дуплексом D_2 , можно считать областью развития золотонности Енисейского кряжа.

2. В юго-восточной части карты низкочастотной составляющей поля в диапазоне азимутов

95–125° (см. рис. 1, б) установлено существенное нарушение простираения гравитационного дуплекса D_2 . Нарушение имеет северо-северо-восточное простираение (12°), видимые признаки правостороннего сдвига (~50 км) и делит область золотонности кряжа на две неравные части – северо-западную и юго-восточную. Аналогичным, но меньшим по размеру нарушением осложнен и дуплекс D_3 .

3. На карте низкочастотной составляющей поля, выделенной в диапазоне азимутов 5–35° (см. рис. 4, б), выявлен более фрагментированный, чем дуплекс D_2 , но не менее протяженный (~300 км) дуплекс D_4 , характерная особенность которого – пространственное совпадение отрицательной ветви дуплекса с ранее выделенной [8] протяженной дугообразной структурой гравитационного поля, проходящей через четыре из пяти наиболее крупных золоторудных месторождения Енисейского кряжа (см. рис. 4, а).

На основе полученных результатов сделана попытка ответить, по меньшей мере, на три вопроса: какова природа дуплексной структуры протяженных низкочастотных гравитационных аномалий Енисейского кряжа; какова причина образования «сдвигового» нарушения дуплексной структуры гравитационного поля в юго-восточной части кряжа; как использовать на практике данные проведенного исследования.

Отвечая на первый вопрос, заметим, что выявленная структура продольных и поперечных вектору силы F гравитационных аномалий полностью соответствует азимутальной структуре продольных и поперечных складок, образующихся в экспериментах по одноосному сжатию вязкоупругих тел. Это позволяет предположить, что азимутальная структура низкочастотной составляющей гравитационного поля кряжа имеет деформационную природу. То есть аномалии плотности, отражаемые низкочастотной составляющей гравитационного поля, вероятно, не в первую очередь зависят от различий петрохимического состава горных пород. Возможно, главная причина имеет термодинамическую природу и связана с необратимыми изменениями плотности горных пород (за счет сокращения пористости породного пространства и перекристаллизации минеральных зерен) при их дефор-

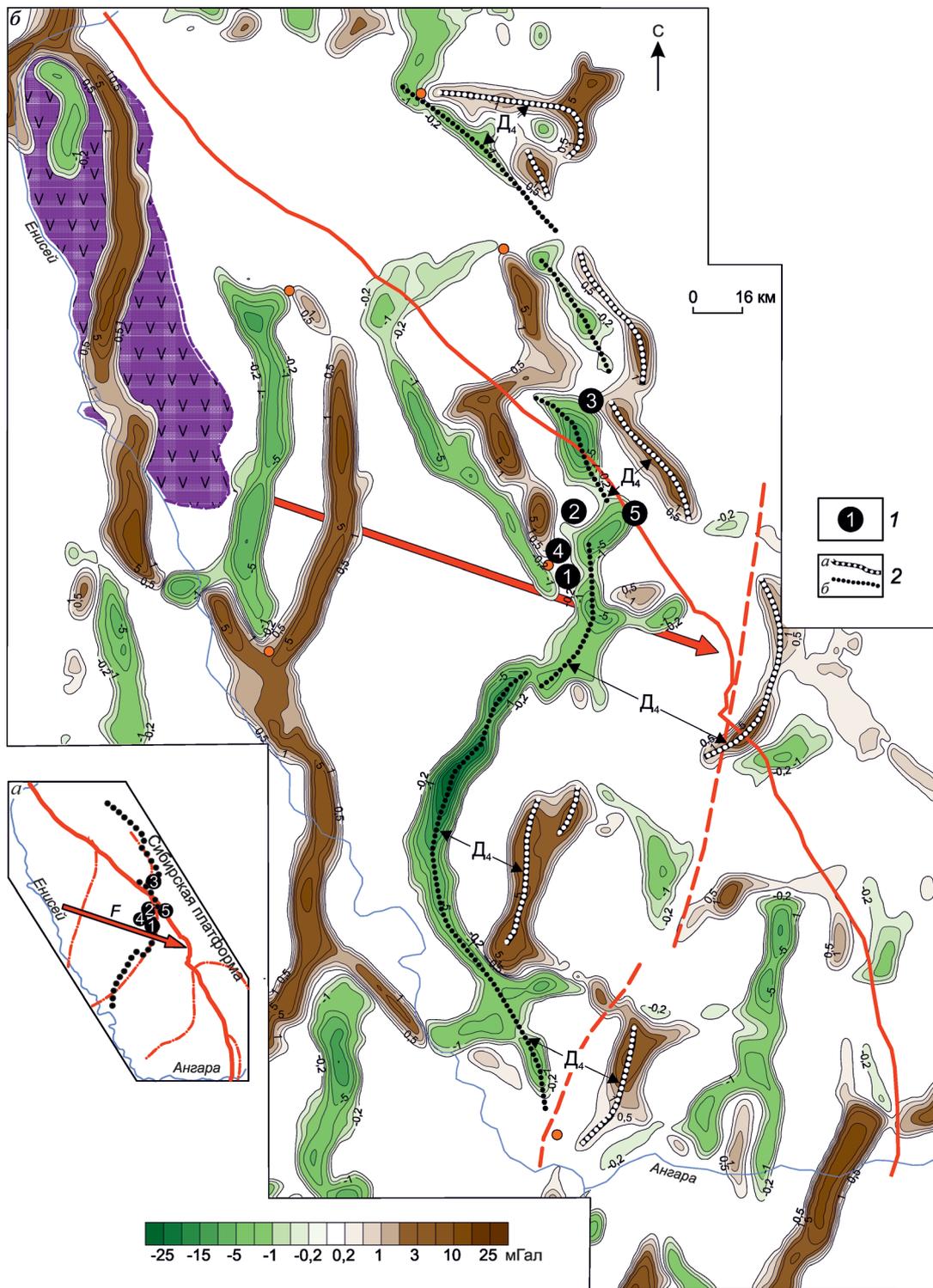


Рис. 4. Дугообразные структуры (а) и низкочастотные аномалии гравитационного поля Енисейского края в диапазоне азимутов 5–35° (б):

1 – месторождения Au с запасами >100 т (1 – Олимпиадненское, 2 – Благодатное, 3 – Советское, 4 – Титимухта, 5 – Эльдorado); 2 – осевые линии положительной (а) и отрицательной (б) аномалий гравитационного дуплекса Д₄; остальные усл. обозн. см. на рис. 1

магии в процессе тектонического взаимодействия. В этом случае изменение же плотности горных пород за счет изменения их петрохимического состава (например, разуплотнение в зонах гранитизации или переуплотнение в зонах амфиболитизации) будет носить вторичный характер и проявляться более высокочастотными аномалиями гравитационного поля. Исходя из этого, странная, на первый взгляд, дуплексная структура низкочастотных аномалий гравитационного поля должна отражать необходимое динамическое равновесие, равенство объемов геологического пространства, занятого как относительно уплотненными, так и разуплотненными породами.

Для ответа на второй вопрос о причине образования крупного «сдвигового» нарушения гравитационного дуплекса D_2 в юго-восточной части кряжа (см. рис. 1, б) в его окрестности по данным геологической карты м-ба 1:500 000 была построена карта пространственной плотности геологических разломов, сонаправленных этому нарушению (рис. 5, а). Заметное увеличение пространственной плотности геологических разломов, азимуты простирания которых лежат в диапазоне $357-27^\circ$ ($\pm 15^\circ$ вокруг азимута 12°) в окрестности гравиструктурного нарушения, может указывать на действительное существование последнего. Конечно, объяснить причину образования гравиструктурного нарушения данное построение не может, однако оно говорит о малой вероятности того, чтобы столь протяженное нарушение было обычным правосторонним сдвигом, не замеченным при геологической съемке.

С другой стороны, из физики твердого тела известно, что базовым механизмом пластической деформации является сдвиг по плоскостям скольжения. При этом наиболее эффективное снижение внешней механической нагрузки обеспечивают процессы, способствующие росту числа таких плоскостей. В вязкоупругих телах, к которым относятся и горные породы, ведущий из таких процессов – процесс «поворота материальных волокон, при котором все новые и новые материальные плоскости становятся плоскостями скольжения» [2]. Можно предположить, что деформация горных пород Енисейского кряжа под действием силы F происходила по аналогич-

ному адаптационному сценарию в направлении снижения внешней механической нагрузки. В этом случае наиболее вероятным механизмом такой деформации должен быть механизм кручения, позволяющий создавать максимальное число плоскостей скольжения в ограниченном объеме геологического пространства. В соответствии с деформационной моделью кручения области пространства, занятой гравитационным дуплексом D_2 (см. рис. 5, б), пара гравитационных аномалий дуплекса должна закономерно смещаться в юго-юго-восточном направлении. Область кручения M на рисунке лишь внешне похожа на сдвиг в его чистом виде. Скорее всего, в этой области максимально проявилось объемное кручение горных пород, а сама область выполнила функцию пластического шарнира, сохранившегося в виде обнаруженного субмеридионального гравиструктурного нарушения. Доказать или опровергнуть кручение горных пород в области M помогло бы специальное изучение их тектонического узора, в частности выявление структур R -тектонитов.

Перечислим важные, на наш взгляд, геологические аргументы в пользу того, что рассмотренная деформационная модель дуплекса D_2 является моделью именно правостороннего (если смотреть по направлению вектора F) кручения. Обращает на себя внимание существенное различие форм северной (положительной) и южной (отрицательной) аномалий дуплекса D_2 на отрезке между р. Енисей и гравиструктурным нарушением (см. рис. 1, б). Осевая линия положительной аномалии более прямолинейна, чем аналогичный фрагмент южной аномалии, осевая линия которой сильно изогнута в плане. Полагая что обе гравитационные аномалии дуплекса инициированы действием одной и той же силы F , асимметрию форм разнополярных аномалий можно объяснить вероятным различием механических свойств горных пород вдоль северной и южной аномалий дуплекса D_2 , а именно преобладанием более пластических деформаций вдоль южной (отрицательной) аномалии и более упругих вдоль северной (положительной). Можно также предположить, что сильно изогнутая форма осевой линии южной аномалии дуплекса D_2 обусловлена формированием вдоль

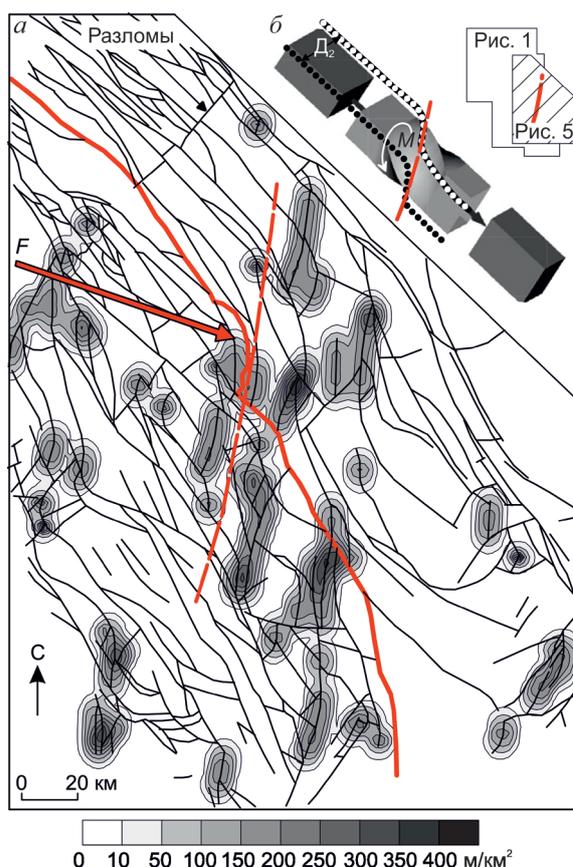


Рис. 5. Карта пространственной плотности тектонических нарушений в диапазоне азимутов 357–27° (а), деформационная модель кручения (б):

усл. обозн. см. на рис. 1, пояснения в тексте

нее специфической формы складчатости – изломов, или кинкбандов (см. рис. 1, в). Механизмы возникновения изломов до конца не ясны, однако «во многих региональных метаморфических поясах кинкбанды формируются на заключительной стадии деформации» пород, вслед за основной складчатостью. При этом для образования изломов должны «существовать некоторые ограничения, которые препятствуют скольжению вдоль плоскостей скольжения» [3]. Это обстоятельство позволяет предположить, что сложная форма отрицательной аномалии дуплекса D_2 – результат деформации пород при наличии в них блоков, механически более жестких, чем деформируемые породы.

Для проверки этой мысли был выполнен сравнительный анализ суммарной протяженно-

сти древнейших метаморфических пород (как индикатора наличия жестких блоков) и коллизионных гранитов (как индикатора интенсивности складчатости) вдоль осей разнополярных аномалий дуплекса D_2 . Он показал, что суммарная относительная протяженность древнейших до-рифейских метаморфических пород (кристаллические сланцы гаревского и гранитогнейсы пенчегинского комплексов) и позднерифейских гранитов татарско-аяхтинского комплекса вдоль оси северной положительной аномалии дуплекса составила 9% от длины аномалии, тогда как вдоль оси южной отрицательной аномалии – 76%. Предположив, что консолидированные массивы метаморфитов гаревского и пенчегинского комплексов выступили в роли вышеуказанных «некоторых ограничений» или жестких блоков, повлиявших на процесс деформации пород сухопитской серии в позднерифейский коллизионный период эволюции кряжа, можно дать объяснение сильной изломанности осевой линии южной аномалии дуплекса D_2 .

Северная аномалия дуплекса D_2 имеет более простую форму. Положительный знак аномалии позволяет предположить, что ее источником являются сравнительно плотные, механически жесткие породы. На это, в частности, указывает размещение в створе северной аномалии дуплекса D_2 небольшого по площади распространения, но показательного по смыслу (практически единственного на Енисейском кряже) поля развития пикритовых трубок и даек чапинского комплекса щелочных ультрабазитов (см. рис. 1, б). Исследователи этого редкого типа пород, исходя из состава пород комплекса и их взаимоотношений, предполагают, что сформировались они при быстром пульсационном подъеме из глубинных очагов магм, соответствующих вулканическим сериям рифтогенных структур консолидированных блоков [5]. То есть формирование кимберлитоподобных пород чапинского комплекса, скорее всего, происходило в высокотемпературных условиях относительно жестких и плотных пород.

Таким образом, особенности геологического строения северной и южной аномалий дуплекса D_2 вполне определенно указывают на то, что южная часть дуплекса развивалась в условиях

преобладания пластических деформаций и существенного разуплотнения горных пород процессами гранитоидного магматизма, а северная – вероятно, всегда оставалась механически более жесткой и развивалась в условиях преобладания упругих деформаций. Это различие и могло стать главной причиной «скручивания» юго-восточной части всей геологической структуры Енисейского кряжа вокруг выявленного гравиструктурного нарушения (сыгравшего роль пластического шарнира) в направлении механически более ослабленной южной части.

Ответ на третий вопрос (о практической значимости исследования) разделен на два аспекта. Первый акцентирует внимание на общей познавательной значимости исследования и связан с несколькими конфигурационными корреляциями выявленных деформационных структур гравитационного поля и основных рудоконтролирующих факторов Енисейского кряжа. Первая корреляция связана с Ишимбинским глубинным разломом-надвигом: если его северо-западную ветвь провести несколько южнее современного положения, а именно через цепочку коллизионных гранитов, то он займет положение диагонали в контуре дуплекса D_2 , (рис. 6, а). Это кажется логичным, так как в данном случае большая часть всех массивов коллизионных гранитов кряжа попадет в 10-километровую зону влияния Ишимбинского разлома. При этом диагональное положение разлома между северной и южной аномалиями дуплекса D_2 становится аналогичным диагональному положению зоны разрушения образцов вязкоупругих тел, возникающей на последних стадиях их сильного одноосного сжатия (см. рис. 3, в). То есть Ишимбинский разлом за все время своей геологической активности выполнял функцию долгоживущей зоны концентрации и разгрузки избыточных механических напряжений.

Вторая конфигурационная корреляция связывает контуры областей пересечения крупнейших взаимно ортогональных дуплексов D_2 и D_4 и максимальной концентрации коллизионных гранитов (см. рис. 6, б). Пространственное совпадение указанных контуров позволяет считать место пересечения дуплексов D_2 и D_4 центром гранитизации кряжа, т.е. областью максимального выде-

ления внутренней энергии тектонического взаимодействия Исаковского террейна и Сибирской платформы. Релаксация, рассеяние, этой энергии в пиковый период коллизионной гранитизации (позднерифейское время) могла происходить, в том числе, и через механизм кручения пород за счет стока сдвиговых деформаций в южном (относительно центра гранитизации) направлении, вдоль крупного гравиструктурного нарушения, рассмотренного выше. В этом случае кручение можно считать одной из адаптивных реакций горных пород, возникающих в непосредственной близости от области их сильного локального разогрева (так скручивается лист бумаги в огне).

Еще одна конфигурационная корреляция связала три объекта: наиболее протяженную из дугообразных структур («притягивающих к себе» 75% золоторудных объектов кряжа [8]), отрицательную аномалию дуплекса D_4 , а также четыре из пяти наиболее крупных по запасам месторождения золота (см. рис. 4, а). В этой триаде особый интерес представляет корреляция золоторудных месторождений одновременно с гравитационными аномалиями разной полярности и разной частоты – отрицательными низкочастотными и положительными высокочастотными. Природа такой корреляции автору не ясна. Можно только предположить, что она связана с плотностной дифференциацией менее жестких пород верхнего структурного этажа разреза (рифейские зеленые сланцы сухопитской серии) под действием сейсмотектонических процессов, протекавших в более компетентных породах нижнего структурного этажа (дорифейские кристаллические сланцы тейской серии). И если предположить, что разгрузка кремнеземных золоторудных растворов, генерируемых в области разуплотнения нижнего структурного этажа (отрицательная аномалия дуплекса D_4) или прошедших через эту область транзитом из мантии, происходила в зонах локального уплотнения (дугообразные структуры) пород верхнего структурного этажа, то это могло бы объяснить эмпирически установленную пространственную корреляцию золоторудных объектов и локальных положительных аномалий гравитационного поля [9]. Таким образом, принятие гипотезы о деформационной природе гравитационного поля

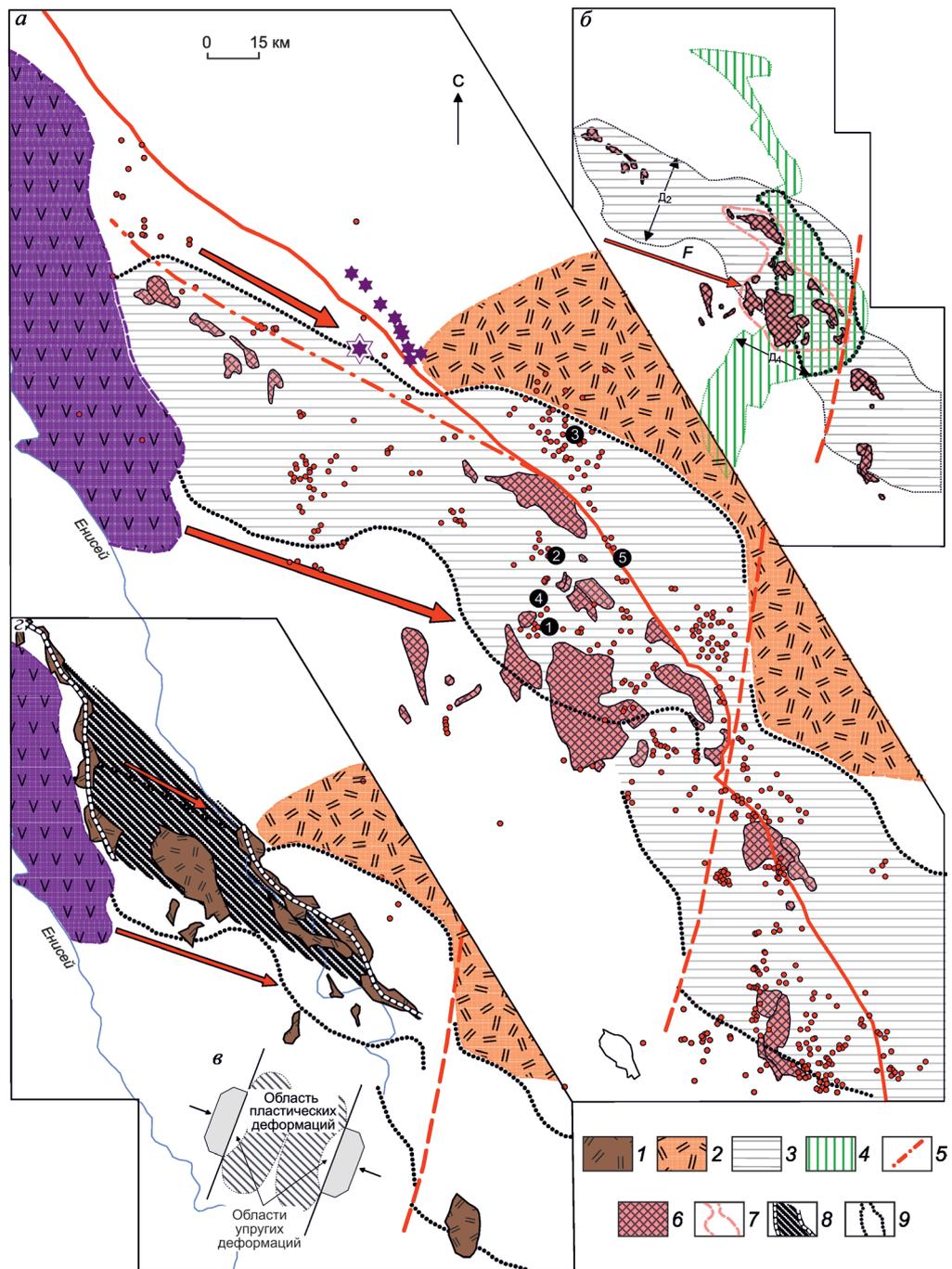


Рис. 6. Область золотонности Енисейского кряжа (а), пересечение главных гравитационных дуплексов северо-западного и субмеридионального простирания (б), распределение областей пластических и упругих деформаций в окрестности плоского штампа (в), расположение блоков протерозойских пород (г):

1 – кристаллические сланцы свиты хребта Карпинского, PR_1 ; 2 – предполагаемый контур юго-западной части Сибирской платформы; области гравитационных дуплексов: 3 – D_2 , 4 – D_4 ; 5 – смещенная линия Ишимбинского разлома; 6 – коллизионные граниты татарско-аяхтинского и гурахтинского комплексов, R_3 ; 7 – область максимальной пространственной плотности коллизионных гранитов; 8 – общая конфигурация поля упругих деформаций; 9 – область пересечения дуплексов D_2 и D_4 ; остальные усл. обозн. см. на рис. 1 и 4

Енисейского кряжа усложняет взаимоотношение аномалий разных пространственных частот, ставя под сомнение однозначность интерпретации гравитационных аномалий как отражение различий только петрохимического состава горных пород.

Второй аспект акцентирует внимание на прагматической значимости проведенного исследования и связан с важной, на взгляд автора, проблемой локализации площадей с преобладанием режима упругих деформаций горных пород. С точки зрения прогнозирования золоторудных месторождений на Енисейском кряже области, где происходит накопление упругих деформаций (а значит, и их снятие через дизъюнктивные нарушения), интересны тем, что являются эффективными концентраторами зон открытой трещиноватости горных пород. Трудность в том, что упругие деформации обратимы и не оставляют «видимых» следов в перераспределении плотности, отчего не могут быть обнаружены средствами гравиметрии. Но если предположить, что рассматриваемое позднерифейское тектоническое взаимодействие Исаковского террейна и Сибирской платформы не было быстротечным, то породы, слагавшие консолидированный фундамент кряжа в то время, не могли на него не отреагировать. Относительно жесткие блоки фундамента должны были существенно изменить вещественный состав в тех областях, где пластические деформации преобладали над упругими и, наоборот, минимально там, где упругие деформации преобладали над пластическими.

Существование областей второго типа допускается в непосредственной близости от плоского штампа (см. рис. 6, в) [1], поэтому обнаружить слабоизмененные жесткие блоки фундамента вероятнее всего вблизи мест непосредственного приложения тектонических сил. Исходя из этого соображения, была составлена карта наиболее древних дорифейских пород тейской серии – свиты хребта Карпинского и пенченгинской. По геологическим данным эти породы не претерпели ультраметаморфизма и до сих пор обладают четкой литолого-структурной индивидуальностью карбонатно-терригенных образований (некоторые исследователи считают их

останцами фундамента Сибирской платформы в заангарской части Енисейского кряжа [4]). На рис. 6, г отражены главные особенности размещения пород тейской серии: во-первых, они образуют две полосы массивов, субпараллельные предполагаемым границам Исаковского террейна и Сибирской платформы, и, во-вторых, восточная полоса массивов смещена к югу. То есть получается, что массивы дорифейских пород в местах приложения тектонических сил сохранились в слабо измененном состоянии и в той конфигурации, которая воспроизводит общую для кряжа геометрию поля упругих деформаций. Такие деформации, как известно, не вызывают глубокого изменения вещественного состава горных пород, но допускают при этом возможность некоторой механической подвижки отдельных жестких блоков в соответствии с конфигурацией поля деформаций.

Полученный результат малопригоден для локализации областей накопления упругих деформаций, поскольку выделенная на рис. 6, г область деформаций охватывает всю территорию кряжа, отражая общую конфигурацию поля упругих деформаций. Однако можно предположить, что в силу общности динамической причины конфигурация полей упругих деформаций и на более локальных участках (соответствующих рангу рудных полей) будет в основном повторяться на всей территории кряжа и поэтому может быть установлена из анализа других видов геофизических полей, также чувствительных к деформационному состоянию горных пород. Среди этих полей особое внимание заслуживают магнитное поле и поле удельного электрического сопротивления. Впрочем, это предмет дальнейших исследований.

Завершая обсуждение полученных результатов, назовем наиболее важный из них – явление при помощи частотно-азимутального анализа дуплексной структуры низкочастотных гравитационных аномалий, отражающей деформационную природу гравитационного поля Енисейского кряжа. Установленный при этом ряд пространственных корреляций гравитационных дуплексов с геологическими факторами золотоносности кряжа позволяет выделить среди них тектонический фактор как ключевой. В

более же широком контексте (включая и две ранее представленные работы [8, 9]) отметим, что в проведенном исследовании была предпринята попытка последовательно (от эмпирического обобщения через теоретический анализ к практическому применению) взглянуть на гравитационное поле Енисейского кряжа с непривычной для гравиметрии точки зрения – термодинамики геологических процессов. Отсутствие математического аппарата, полностью соответствующего специфике такой точки зрения и таких процессов, заставляет обратить внимание на морфологический метод анализа полей как на важный инструмент, предшествующий построению правдоподобных физико-геологических моделей.

Автор выражает признательность рецензенту данной статьи, бескомпромиссная критика которого позволила избавиться текст от еще более спорных выводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартоломей А.А. Механика грунтов. Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004.
2. Бейгельзимер Я.В., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. – Донецк: НАН Украины, Фирма ТЕАН, 2003.
3. Геологические структуры. Пер. с англ. / Под ред. Т.Уемуры, Ш.Мицутани. – М.: Недра, 1990.
4. Даценко В.М. Гранитоидный магматизм юго-западного обрамления Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 1984.
5. Динер А.Э., Качевская Г.И., Качевский Л.К. Эталон Чапинского комплекса щелочных пикритов (Енисейский кряж). – Красноярск: КНИИГИМС, 2000.
6. Исаковский террейн и его обрамление / А.А.Стороженко, Н.Ф.Васильев, С.Д.Сидорас и др. // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири: мат-лы научно-практической конференции. Красноярск, 2010. С. 211–222.
7. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. – М.: Наука, 1988.
8. Макеев С.М. Скопления золоторудных объектов Енисейского кряжа в дугообразных структурах гравитационного поля // Руды и металлы. № 5. 2014. С. 72–82.
9. Макеев С.М. Пространственная корреляция гравитационного поля и золоторудных объектов Енисейского кряжа // Руды и металлы. № 3. 2014. С. 17–26.
10. 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.
11. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 62–69.
12. Панин С.В., Нойманн П., Байбулатов Ш.А. Исследование развития деформации на мезоуровне интерметаллического сплава $Ni_{63}Al_{37}$ при сжатии // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 1. С. 75–82.

Макеев Станислав Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук
smmakeev@mail.ru

SEARCH DEFORMATION STRUCTURES OF THE YENISEI RIDGE ACCORDING TO THE AZIMUTHAL ANALYSIS OF GRAVITY FIELD

S.M. Makeev

Based on a previously identified regular system of extended arc-shaped gravity field structures of of the Yenisei Ridge and on the assumption about their tectonic nature, the author attempted to find direct evidence of the tectonic interaction between Isakovsky terrane and SW margin of the Siberian Craton. Directional analysis demonstrated duplex nature of the low-frequency gravity anomalies. Arguments favoring deformational nature of these anomalies are presented. The anomalies are spatially correlated with key controls and manifestations of gold mineralization: the Ishimbinsk regional thrust, a granitization center, and largest bedrock gold deposits. An attempt was made to portray a general configuration of the elastic deformation field over the entire Yenisei Ridge.

Key words: Yenisei Ridge, arcuate structures, duplex structure, gravity field anomaly, granite, thrust, elastic deformation, gold deposit.