

УДК 550.831

К.В. Вандышева, Е.В. Кадьшева

ОПЫТ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ РУДНЫХ РАЙОНОВ УРАЛА

Тектонофизический анализ гравитационного поля дает количественное представление о напряженно-деформированном состоянии геологической среды. Основные результаты анализа хорошо согласуются с оценками тектонофизической обстановки в пределах месторождений, полученными другими методами. Поэтому правомерен вывод о том, что теоретические предпосылки разрабатываемого тектонофизического анализа поля силы тяжести верны, а его результаты имеют практическое геологическое значение.

Ключевые слова: гравитационное поле, дилатация, тектонофизический анализ, напряженно-деформированное состояние геологической среды, Тагило-Кушвинский железорудный район, Березовское золоторудное месторождение.

Главной движущей силой процесса деформирования геологической среды и, как следствие, структуро- и рудообразования, является гравитация [1]. Изучение влияния силы тяжести на деформирование земной коры началось во второй половине 60-х годов XX века. Тогда же Дж. Деннис сформулировал понятие гравитационная тектоника, трактуя ее как процесс и результат деформации пород, обусловленный преимущественно воздействием силы тяжести [1]. Эта важнейшая для тектоники и структурной геологии проблема стала первоначально решаться экспериментально на моделях, подвергаемых центрифугированию, и теоретически.

Наиболее существенные результаты при экспериментальных исследованиях на моделях были получены Х. Рамбергом, изучавшим такие явления, как гравитационное оседание, растекание и диапиризм [2]. В приложении к анализу различных геологических структур он рассмотрел “всплывание” слоев, пространственное расположение соляных диапиров

и поднятий блоков фундамента, движение надвиговых пластин в результате гравитационного проседания и расползания слоев, движение магматических расплавов через жесткий покров, эволюцию орогенов и океанических хребтов, субдукцию, континентальный рифтогенез и другие.

Результаты физического моделирования, характеризуясь наглядностью, не позволяют количественно оценивать силовое воздействие перемещающихся масс вещества на окружающую среду. Задача о количественном изучении напряжений, обусловленных плотностными неоднородностями, была поставлена М.В.Гзовским [3]. Формулируя ее, он исходил из того, что гравитационное поле воздействует на неоднородности, а поскольку они связаны с вмещающей их средой и возможности для их относительного перемещения ограничены, то это должно приводить к возникновению напряжений в среде и в неоднородностях.

Позднее А.П. Трубициным [4, 5], было показано на простых моделях, что плотностные неоднородности в

коре и мантии способны создавать значительные напряжения, влияние которых нельзя не учитывать при изучении динамики этих геосфер. К аналогичному выводу пришли И.А. Маслов и А.Е. Молчанов, выполнивших оценку деформаций и напряжений, обусловленных точечной массой, помещенной в однородном упругом полупространстве, на которую действует сила тяжести [6].

Плотностные неоднородности в земной коре только при значительной глубине залегания, по сравнению с их размерами в плане и в разрезе, можно уподоблять точечным массам. В иных ситуациях реальное распределение плотностных неоднородностей заменяют эквивалентным ему по гравитационному действию простым слоем [7, 8]. Но как отмечается в [9], «такое допущение приемлемо только при мелкомасштабных исследованиях, когда простой слой можно сопоставить с некоторой оболочкой земли конечной мощности». Иной способ оценки напряжений предложен в [9]. Он основан на численном решении уравнения равновесия. Среда в этом варианте решения задачи представлена упругим полупространством, в котором заданы объемные силы, обусловленные реальным распределением масс, и рельефом дневной поверхности. Поэтому результирующее смещение определяется объемной и поверхностной силами.

Методика исследований

Геологическая среда под действием силы тяжести находится в напряженном состоянии. Если бы плотность среды была постоянной, то напряжение в ней нарастало бы по линейному закону. Но геологическая среда в плотностном соотношении неоднородна; в ней есть объекты, которые характеризуются различной плотностью. Поэтому напряжения в ней из-

меняются по более сложному закону. В неоднородной среде возникают области повышенного и пониженного напряжения. Соответственно, по-разному происходит и деформирование различных фрагментов среды. Они испытывают различные по интенсивности деформации растяжения, сжатия, сдвига, вращения. В геологическом отношении это приводит к формированию разнообразных структур: складок, диапиров, флексур, разломов.

Плотностные неоднородности с одной стороны способствуют неоднородному деформированию геологической среды, т.е. являются источниками аномалий в поле деформаций, которое количественно характеризуется тензором деформации; с другой стороны, те же неоднородности выступают как источники аномалий в поле силы тяжести. Таким образом, два различных физических поля: поле деформации и поле силы тяжести создаются одним источником — плотностной неоднородностью геологической среды. Следовательно, между этими полями должна существовать связь, используя которую можно вычислять по результатам измерения поля силы тяжести, характеристики поля деформации (компоненты тензора деформаций), т.е. изучать напряженно-деформированное состояние среды.

Такая связь была установлена для модели среды, представляющей собой однородное упругое полупространство, в котором находится плотностная неоднородность произвольной формы с *плотностью*, отличающейся от плотности полупространства. Модули упругости полупространства и неоднородности приняты одинаковыми. Задача рассмотрена для двух реакций среды на силовые воздействия: упругой (тело Гука) и упруго-вязкой (тело Максвелла) [10].

Метод оценки компонентов тензора деформаций по результатам измерения напряженности поля силы тяжести был назван тектонофизическим анализом поля силы тяжести, суть которого заключается в следующем: компоненты вектора смещения $S(u, v, w)$, обусловленные гравитационной силой, определяются следующими выражениями [10]:

$$\left. \begin{aligned} u &= P[(1-2\nu)C_1(W) - C_2(W)]W, \\ v &= P[(1-2\nu)C_3(W) - C_4(W)]W, \\ w &= P\left[2(1-\nu) - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}C_5(W)\right]W, \end{aligned} \right\}$$

где $P = \frac{g}{4\pi\mu k}$; g — ускорение свободного падения; μ — модуль сдвига; k — гравитационная постоянная; ν — коэффициент Пуассона; W — гравитационный потенциал плотностной неоднородности; $C_1(W), C_2(W), C_3(W), C_4(W), C_5(W)$ — некоторые безразмерные функции, зависящие от потенциала.

Компоненты вектора смещений являются промежуточным результатом. Они служат только основой для вычисления по формулам Коши компонентов тензора деформации [13]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \end{aligned} \right\}$$

которые, в свою очередь, служат для вычислений главных значений и главных направлений тензора чистой деформации, дилатации, удельных работ деформирования формы и объема тела, коэффициентов Лодэ-Надаи и других характеристик поля дефор-

мации [13], т.е. с помощью тектонофизического анализа поля силы тяжести решается та же задача, что и с помощью методов классической тектонофизики, в которой характеристики напряженно-деформированного состояния геологической среды определяются путем изучения деформационных структур (складки, разрывы, трещины и др.) при условии их хорошей обнаженности. Одним из достоинств тектонофизического анализа поля силы тяжести является то, что по результатам его площадных измерений в разных масштабах можно изучить поля деформаций различных рангов соответствующих различным по масштабу геологическим структурам.

Основные результаты

Тектонофизический анализ поля силы тяжести как метод изучения напряженно-деформированного состояния среды был применен для изучения ряда месторождений, сейсмичности района г. Екатеринбурга и решения других задач [12, 13]. Рассмотрим результаты этого анализа на примерах Тагило-Кушвинского железорудного района и Березовского золоторудного месторождения.

Геофизическими исследованиями 80-х годов было установлено, что Тагило-Кушвинский район характеризуется крупной гравитационной аномалией. Подобные аномалии характерны для всех ультрабазитовых плутонов Платиноносного пояса. Особенность Тагило-Кушвинского максимума силы тяжести (Δg) состояла в том, что по геологическим данным ему отвечал не крупный плутон, а группа небольших гипербазитовых интрузий. Выполненная интерпретация позволила коренным образом изменить геологическое представление о строении северной части Тагильского комплекса. Наблюдаемое поле силы тяжести уда-

лось объяснить плотностной неоднородностью (рис.1), которую в геологическом отношении можно трактовать как плутон ультрабазитов. Фрагментами этого плутона являются картируемые на дневной поверхности отдельные тела ультрабазитов, составляющих Баранчинскую группу. Плутон являясь основным источником поля силы тяжести Тагило-Кушвинского района, должен оказывать существенное влияние на естественное поле напряжений, т.е. на процессы деформирования среды, играющие, как уже отмечалось, не последнюю роль при рудоотложении.

Используя представления о форме плутона, а также результаты площадной гравиметрической съемки масштаба 1:50000 и сведения о физико-механических свойствах пород, на весь Тагило-Кушвинский район в узлах квадратной сети (500x500 м) были вычислены главные значения и главные направления тензора чистой деформации [10].

Общая характеристика поля деформаций Тагило-Кушвинского района такова. Первые два главных направления деформаций на всей территории лежат в горизонтальной плоскости (плоскости наблюдений); третье главное направление перпендикулярно этой плоскости, а соответствующие ему главные значения являются сжатием. Наибольшие по величине растягивающие и сжимающие деформации пространственно соответствуют плутону и обрамляющим его с востока интрузивным массивам. Первые два главных значения тензора деформаций здесь примерно одинаковы. С удалением от плутона главные значения плавно убывают. Поскольку плутон вытянут в меридиональном направлении, то эллиптическое сечение поверхности деформации вырождается в отрезок прямой,

который имеет широтную ориентировку. На расстоянии около 10-15 км от восточного контакта плутона происходит резкое изменение характера поля деформаций. Оно заключается в том, что почти на 90^0 изменяет свою ориентировку первое главное направление и существенно возрастает второе главное значение. Третье главное значение в этой части территории приобретает минимальную для всего района величину. Отмеченную особенность поля деформаций следует рассматривать как локальную аномалию, создаваемую плутоном и другими плотностными неоднородностями. Поскольку район, для которого выполнены расчеты, является рудным, то анализ полученных результатов был осуществлен с металлогенических позиций.

Первый вывод, который следует сделать из сопоставления поля деформаций с распределением месторождений и рудопроявлений, заключается в том, что все месторождения района: Гороблагодатское, Валуевское, Лебяжинское, Высокогорское (за исключением Естюнинского) и часть рудопроявлений пространственно совпадают с описанной выше аномальной зоной. Это совпадение является, по нашему мнению, не случайным. Многие исследователи отмечают особое металлогеническое значение локальных участков земной коры с аномальными характеристиками полей напряжений и деформаций. К таким характеристикам, прежде всего, относят наличие растягивающих деформаций (напряжений) и резкое изменение в ориентировке главных направлений и величине главных значений тензора деформаций по сравнению с общей структурой поля деформаций изучаемого района. Именно этими качествами и обладает аномальная зона.

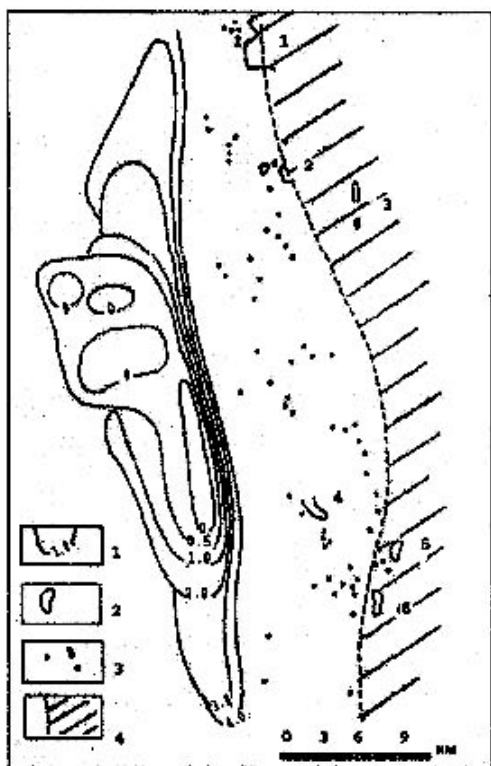


Рис. 1. Морфология Плутона гипербазитов и металлогенические результаты анализа поля деформаций: 1 — изогипсы поверхности Плутона гипербазитов (оцифровка в км); 2 — месторождения; 3 — рудопроявления; 4 — область аномальных значений поля деформаций. Месторождения: 1 — Гороблагодатское; 2 — Валуевское; 3 — Осокино-Александровское; 4 — Естюнинское; 5 — Лебяжинское; 6 — Высокосгорское

Плутоном и другими плотностными неоднородностями в описанной зоне в течение длительного времени создавалась и поддерживалась стабильная напряженно-деформированная обстановка, способствовавшая повышению проницаемости и пористости среды — факторам, благоприятным для рудообразования.

В рамках принятой модели аномальная зона оказалась однородной, поскольку количественная характери-

стика деформаций в каждой расчетной точке примерно одинакова. Распределение же месторождений говорит о том, что внутри зоны в процессе деформирования возникали локальные участки более высокого порядка с повышенным уровнем деформаций. К таким участкам и приурочены месторождения.

Неоднородное строение зон повышенных деформаций и, соответственно, различие перспектив отдельных частей этих зон, геологи достаточно давно отмечали при полевых исследованиях. Наиболее ценное обобщение эмпирического материала о роли тектоники в размещении полезных ископаемых сделал Херасков Н.П. [11]. Он сформулировал два закона. Первый закон гласит, что при деформации тела в нем возникают участки, «в которых сосредотачиваются преимущественно деформации». Эти участки разделены слабо деформированными блоками. Результаты экспериментов по разрушению образцов горных пород подтверждают эмпирический вывод Хераскова Н.П., только на другом масштабном уровне. Эти же результаты дают физическое обоснование и для второго закона, которым утверждается, что участки повышенного уровня деформаций являются наиболее проницаемыми для рудоносных флюидов.

Анализируя результаты вычисления деформаций и, принимая во внимание эмпирические законы Хераскова Н.П., следует вывод о двухуровневой структуре Тагило-Кушвинского железорудного района. Первый уровень отвечает рудному поясу, характеризующемуся аномальными параметрами поля деформаций. Второй уровень соответствует рудным узлам, в которых находятся крупные месторождения.

Рудопроявления района расположены в основном в полосе, ограни-

ченной с запада плутоном, с востока — аномальной зоной поля деформаций. Резкое различие в пространственном распределении месторождений и рудопроявлений можно объяснить, исходя из особенностей напряженно-деформированного состояния среды в этих частях рудного района.

На территории Естюнинского месторождения был выполнен анализ с оценками различных видов упругой энергии и дилатации.

Результаты показали, что Естюнинское месторождение располагается в градиентной части полей удельной энергии деформации объема и формы, в области положительных значений дилатации и вблизи границы смены ее знака [13]. Все перечисленные качества, характеризующие напряженно-деформированное состояние среды, являются, как уже отмечалось в многочисленных геологических материалах, одними из неперменных атрибутов формирования любого месторождения (рис. 2).

Обратим внимание на два момента: во-первых, месторождение располагается в зоне с относительно невысокими значениями удельной энергии деформации объема, во-вторых, оно находится вблизи области с отрицательной дилатацией. Невысокий уровень удельной энергии предполагает и относительно невысокую склонность среды к разрушению. Но поскольку месторождение все-таки находится в этой среде, то можно сделать вывод о том, что, по-видимому, существует некоторая оптимальная проницаемость (нарушенность) горных пород наиболее благоприятная для рудоотложения. Крайние случаи — очень малая и очень большая проницаемости затрудняют развитие этого процесса. В плохо проницаемых породах он вообще не идет, а в очень

проницаемых, при отсутствии экранов, формируется рассеянная (вкрапленная) минерализация. Роль одного из экранов в данном случае, вероятно, играет область, характеризующаяся отрицательными значениями дилатации.

Березовское золоторудное месторождение расположено в 12 км на северо-восток от г. Екатеринбурга.

Первая особенность геологического строения верхней части земной коры района Екатеринбурга заключается в широком развитии здесь интрузивных массивов: Верх-Исетского, Свердловского, Шарташского, Шувакишского, Широкореченского и Уктусского. Первые три являются существенно гранитоидными и гранитными, Уктусский массив дунит-пироксенит-габбровый, Шувакишский и Широкореченский являются массивами габбро.

Вторая особенность заключается в том, что в структурно-тектоническом отношении геологическая среда Екатеринбурга представляет собой узловую структуру, состоящую из большого числа разломов различных рангов, ориентировок и кинематических типов, образующих крупный тектонический узел, центр которого расположен между Свердловским и Шарташским гранитными массивами. В этом узле находится большая часть мегаполиса.

Расчет деформационных характеристик, вызванных плотностными неоднородностями, показал, что поле деформаций, благодаря значительной дифференциации геологической среды по плотности, существенно неоднородно. Неоднородность проявляется в закономерном пространственном изменении величины и знака главных значений и ориентировок главных осей деформации. Каждый интрузивный массив в зависимости от знака

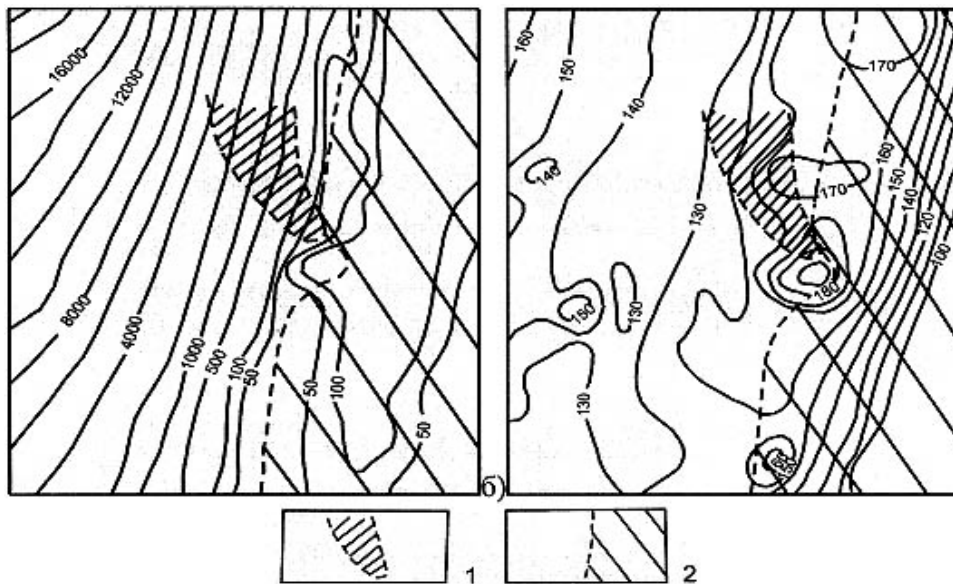


Рис. 2. Распределение удельной энергии деформации (а) — объема, (б) — формы в пределах Естюнинского месторождения: 1 — контур месторождения, 2 — область отрицательных значений дилатации

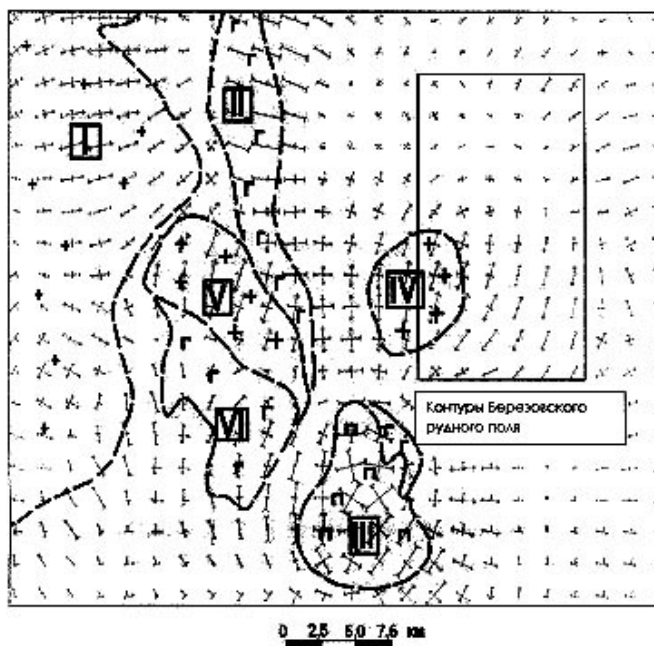


Рис. 3. Поле главных значений тензора чистой деформации района г. Екатеринбурга. Массивы: I — Верх-Исетский; II — Шувакишский; III — Уктусский; IV — Шарташский; V — Свердловский; VI — Ширококоренский

относительной плотности (избыток масс или дефект масс) и формы, характеризуется только ему присущим полем деформации [12].

Тектонофизический анализ поля силы тяжести показал, что под действием гравитационных сил (плотностной неоднородности среды в виде интрузивных массивов) гранитный и гранитоидный массивы создают в среде деформации растяжения. Главные оси этих деформаций, лежащие в горизонтальной плоскости, ориентированы субширотно и субмеридионально. Массивы, сложенные ультраосновными породами, создают деформацию сжатия. Небольшие по разме-

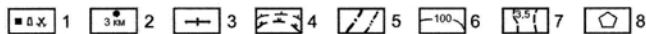
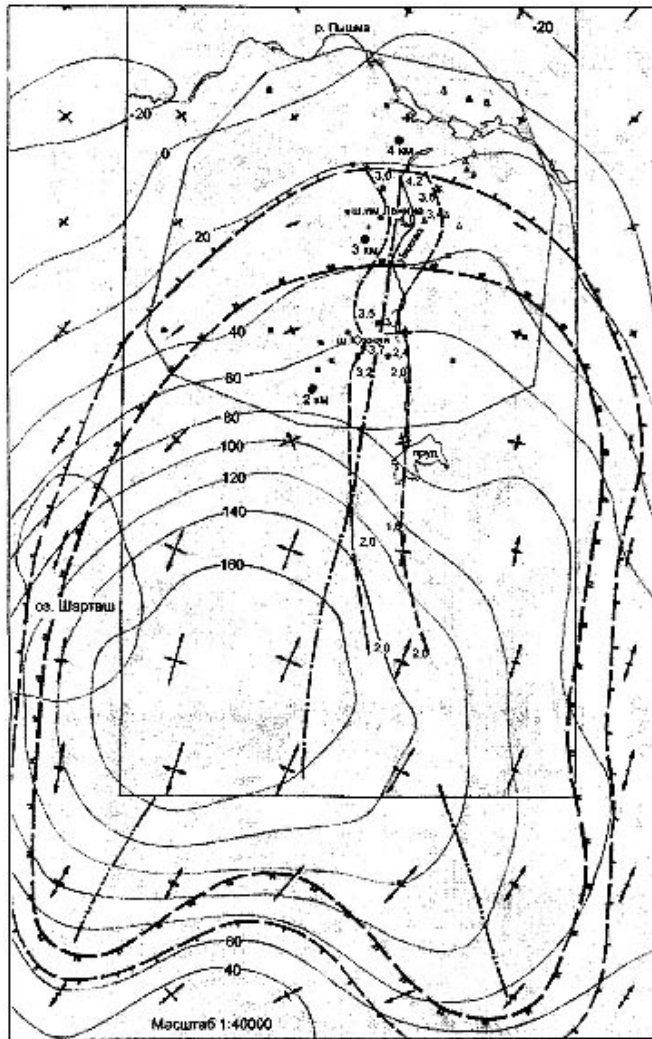


Рис. 4. Деформационная характеристика Березовского золоторудного месторождения: 1 — шахты, рудники; 2 — глубина кровли гранитов по геофизическим данным (в км); 3 — направления растяжения (со стрелками) и сжатия (без стрелок); 4 — контур зоны площадного растяжения (2 штриха) одностороннего растяжения (1 штрих); 5 — оси зоны площадного растяжения первого порядка (одн точка) и второго порядка (2 точки); 6 — изолинии дилатации (в условных единицах); 7 — контур SOH1 пересечения даек с указанием глубин пересечений (в км); 8 — контур зоны промышленного золотого оруденения Березовского рудного поля

рам, эти массивы не оказывают существенного влияния на общий характер

деформирования среды, на большей части территории Екатеринбурга он представляет собой растяжение и сдвиг, то есть среда здесь находится в разгружаемом состоянии. Главные оси деформации растяжения ориентированы вкрест простирания (первая главная ось) и вдоль простирания разломных структур. На рис. 3 представлена характеристика поля тензора чистой деформации; длина стрелок на нем прямо пропорциональна величине относительной деформации (растяжение или сжатие) в каждом узле, а направление стрелок указывает на ориентировку осей деформации.

Режим растяжения, поддерживаемый в течение длительного времени гравитационными силами, должен обеспечивать современную активность разломов и их проницаемость. Этот вывод подтверждается: 1) соответствием ориентировок главных осей деформации и простиранием и кинематикой разрывных нарушений, закартированных геологическими методами; 2) развитием глубоких карманов выветрелых пород по контактам даек гранит-порфиоров в осевых зонах разломов;

3) проявлением в рельефе дневной поверхности новейших движений и наличием флексуно-разрывных зон, являющихся границами между участка-

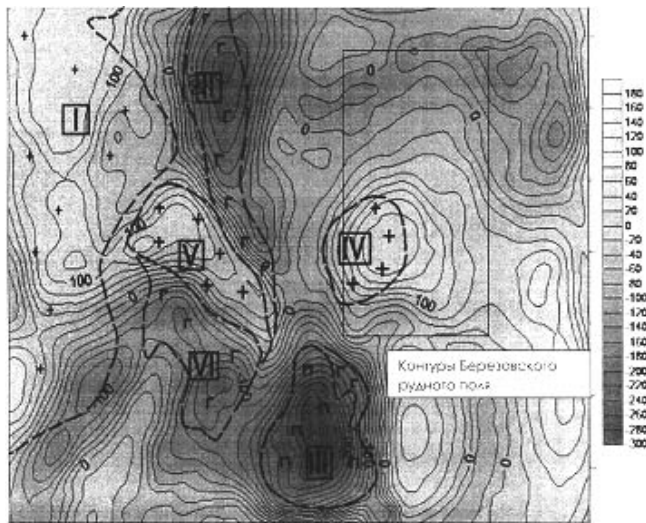


Рис. 5. Поле дилатации района г. Екатеринбурга. Массивы: I — Верх-Исетский; II — Шувакишский; III — Уктисский; IV — Шарташский; V — Свердловский; VI — Ширококореченский

ми относительных опусканий и воздыманий; 4) повышенной концентрацией радона в почвенном воздухе и в подземных водах во флексуно-разрывных зонах.

На площади Березовского рудного поля, в его южной и центральной частях, наблюдается растяжение по двум взаимно перпендикулярным направлениям; причем наибольшее растяжение имеет преимущественно северо-северо-восточное направление. Выделена зона такого площадного растяжения, охватывающая всю южную часть участка, около 2/3 площади. И только в самой северной части участка наблюдаются малые по величине растяжения и перпендикулярные им столь же малые сжатия. Осевая линия зоны площадного растяжения имеет близмеридиональное направление со склонением к востоку. В южной части зона площадного растяжения разделяется на две, в которых выделены осевые линии второго порядка (рис. 4). Поле дилатации $\theta = e_1 + e_2 + e_3$ (где

e_1, e_2, e_3 — главные значения тензора чистой деформации) в пределах рассматриваемой площади положительное (рис. 5).

Наибольшая дилатация отмечается в юго-западной части участка, т.е. в восточной части Шарташского гранитоидного массива, где оно превышает 160 условных единиц.

Приведенные данные позволяют считать, что аномально высокая дилатация в восточной части Шарташского гранитоидного массива, к востоку от него и в направлениях на северо-северо-восток создали благоприятные условия для заложения крутопадающих разломов северо-северо-восточного направления, выполненных дайками. В южной части участка, где дилатация выше, наблюдается увеличение числа даек. К северу при уменьшении дилатации их число сокращается, и они практически не выходят за нулевую линию поля дилатации.

Другим важным вопросом является позиция золотого оруденения. В поле дилатации контур, охватывающий промышленное золотое оруденение, располагается в интервале 0—80 условных единиц.

На карте главных компонент тензора чистой деформации можно отметить, что в южной части участка главные оси растяжения имеют строго северо-восточное направление. В пределах контура, охватывающего промышленное золотое оруденение, кроме северо-восточного направления имеет место субширотное и диагональные направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dennis J. G.* International Tectonic Dictionary. Am. Ass/Geol/ Met., 1967, 7.
2. *Рамберг Х.* Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 1985. 337 с.
3. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975. 536 с.
4. *Трубицин А. П., Карасев А. А.* Упругое напряжение, связанное с неровностями плотностных границ раздела в Земле // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 12. С. 15-22.
5. *Трубицин А. П.* Неровности плотностных границ раздела как источник напряжений в коре и мантии // Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики. Киев: Наукова думка, 1982. С. 39-46.
6. *Маслов И.А., Молчанов А.Е.* Модель напряженно-деформированного состояния среды в области проявления гравитационной аномалии. Препринт. М.: Ин-т Физики Земли, 1980. 8 с.
7. *Тектонические напряжения в районе источника гравитационной аномалии / Модели изменения напряженно-деформированного состояния массива пород в приложении к прогнозу землетрясений.* Апатиты: Кольск. Филиал АН СССР. 1982. С. 61-68.
8. *Маслов И. А.* Динамическая гравиметрия. М.: Наука, 1983. 151 с.
9. *Глазнев В.Н., Маслов Л. А., Комов О. С.* Оценка напряженного состояния земной коры северо-востока Балтийского щита на основе ее плотностной модели // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. №10. С.63-67.
10. *Филатов В.В.* Теория и практика геодинамического анализа гравитационного поля (на примере рудных районов Урала): дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1990. 376 с.
11. *Херасков Н.П.* Роль тектоники в изучении закономерностей размещения полезных ископаемых в земной коре / Закономерности размещения полезных ископаемых. – М., 1958. Т. 1.
12. *Болотнова Л.А.* Методика изучения деформационного состояния геологической среды района Екатеринбурга по гравиметрическим данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 2007, 23 с.
13. *Лейбензон Л.С.* Курс теории упругости. – М.: ОГИЗ – Госгеолтехиздат, 1947. 464 с. **ГЛАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вандышева К.В. — магистрант,
Кадышева Е.В. — аспирант кафедры «Геофизика», e-mail: kadyshhev@k66.ru
Уральский государственный горный университет.



ДИСКУССИЯ

Профессор Билл Макгуайер, эксперт по геологическим рискам Лондонского университетского колледжа (Великобритания) выдвинул гипотезу о том что незначительные климатические явления могут привести к катастрофическим геологическим изменениям. Климатолог Ирина Делюскина, научный сотрудник геологического факультета Калифорнийского университета в Дэвисе (США) и ее коллеги подвергли гипотезу профессора сомнению. Они считают, что современных исследований по палеосейсмологии и статистических данных не достаточно для того, чтобы прийти к определенному мнению по этому поводу.

По материалам журнала «Наука в фокусе»