

- контроль взаимодействия сооружений повышенного уровня ответственности и вмещающей геологической среды;
- выявление возможных негативных геодинамических процессов и опасных изменений свойств и состояния геологической среды;
- прогнозирование и предупреждение опасных техногенных и природных чрезвычайных ситуаций;
- контроль эффективности реализованных мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

УДК 550.831:550.835:622.02

Л.А. Болотнова, С.И. Гуськов, В.В. Филатов

РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАВИДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ РАЙОНА Г. ЕКАТЕРИНБУРГА

Район г. Екатеринбурга, как и вся территория Уральского региона, характеризуется слабой сейсмической активностью. По данным работы [3], в ближайших окрестностях города за все время проведения инструментальных наблюдений, т. е. с 1913 г., было зарегистрировано всего одно землетрясение. Оно произошло 17 августа 1914 г.; его эпицентр находился в районе Билимбаевского завода; интенсивность землетрясения была оценена в 6 баллов, магнитуда в 5 единиц; природа землетрясения однозначно оценена как тектоническая. Всего же за период с 1914 по 2002 гг. на Урале было зарегистрировано 70 сейсмических событий: 34 из них классифицированы как горно-тектонические удары, природа 28 оказалась невыясненной, причиной 7 являются обвалы, провалы, карст, взрывы, горные удары [3]. Из приведенных данных следует, что подавляющая часть сейсмических событий обусловлена хозяйственной деятельностью человека. Средняя глубина очагов этих событий составляет 1,2 км, т. е. очаги находятся в пределах той части земной коры, которая освоена горными работами. И только Билимбаевское событие, глубина залегания очага которого оценена в 26 км, можно отнести собственно к землетрясениям. Тем не менее в последние годы в различных средствах массовой информации стали появляться статьи, заметки, интервью о том, что в ближайшие 5-10 лет в районе г. Екатеринбурга должно произойти землетрясение интенсивностью 6-10 баллов. При этом ни авторы публикаций, ни интервьюируемые не приводят убедительных доказательств в обоснование своих прогнозов.

Проблема прогнозирования землетрясений пока не имеет удовлетворительного решения, поскольку до сих пор у сейсмологов нет ясного представления о механизме землетрясения. Одним из важнейших аспектов проблемы прогнозирования землетрясений является оценка напряженно-деформированного состояния среды. Для решения этой задачи предложены различные методы: геологические, геомеханические, численного, аналитического и физического моделирования и геофизические.

По современным представлениям (Садовский М.А. и др.), геологическая среда может быть уподоблена иерархической системе подобных блоков или структур, вложенных друг в друга, размеры которых подчиняются геометрической прогрессии. Поэтому и физические поля, обусловленные такими системами, также образуют иерархические последовательности аномалий, соответствующие различным уровням иерархии. В полной мере все это относится и к полям напряжений и деформаций. Следовательно, изучать их нужно методами, измерения в которых ведутся на различных базах. Почти идеально подходят для этого геофизические методы и среди них гравиметрия. Почему?

Напряжения в земной коре деформируют среду, при этом происходит изменение объема, что отражается в гравитационном поле. Гравитационное поле, в свою очередь, притягивает плотностные неоднородности с разной силой и соответственно создает свое поле напряжений [4]. Таким образом, поле напряжений вызывается тектоническими и гравитационными силами, которые взаимосвязаны. Зная гравитационное поле, можно учесть составляющую поля напряжений, вызванную им.

Зависимость между компонентами вектора смещения \vec{S} и потенциалом поля силы тяжести W произвольной по форме плотностной неоднородности, находящейся в однородном упругом полупространстве для линейно-упругой реакции среды (тело Гука) [1], выражается формулами

$$\left. \begin{aligned} u &= P \cdot \left[(1-2\nu) \cdot C_x - C_{xzo} \right] \cdot W, \\ v &= P \cdot \left[(1-2\nu) \cdot C_y - C_{yzo} \right] \cdot W, \\ w &= P \cdot \left[2(1-\nu) - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \cdot C_{zzo} \right] \cdot W \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где u, v, w - компоненты вектора смещения \vec{S} по осям x, y, z ; W - гравитационный потенциал; $C_x, C_y, C_{xzo}, C_{zzo}$ - безразмерные функции, зависящие от потенциала; P - константа; ν - коэффициент Пуассона.

Поскольку расчеты u, v, w выполняются на поверхности земли, где вертикальная компонента тензора напряжений равна нулю, то при оценке напряженно-деформированного состояния целесообразно вычислять не компоненты тензора напряжений, а компоненты тензора чистой деформации [1, 5], которые, в свою очередь, служат основой для вычисления главных значений тензора деформации (e_1, e_2, e_3) и углов, характеризующих ориентировку главных осей деформации. Необходимость вычисления главных значений и главных осей заключается в том, что они не зависят от системы координат, в которой решается задача (или выполняются соответствующие измерения); они определяются только условиями деформирования тела, т. е. в них заключена объективная информация о деформации.

Кроме главных значений, являющихся по физическому смыслу относительными растяжениями-сжатиями вдоль главных осей деформации ($e_1 > e_2 > e_3$), деформация описывается рядом параметров, имеющих простой физический смысл. Это первый инвариант тензора или дилатация, коэффициент Лоде-Надаи, удельные энергии деформации объема и формы и другие:

- дилатация, или относительное изменение объема среды, определяется по формуле

$$\theta = e_1 + e_2 + e_3 = \text{div} \vec{S}, \quad (2)$$

где $\text{div} \vec{S}$ - расхожимость вектора смещения; при $\theta > 0$ происходит увеличение объема среды, т. е. её разуплотнение; при $\theta < 0$ происходит уменьшение объема среды, т. е. её уплотнение; при $\theta = 0$ в среде могут образовываться вихревые структуры;

- коэффициент Лоде-Надаи определяется по формуле

$$\mu_e = \frac{2e_2 - e_1 - e_3}{e_1 - e_3}. \quad (3)$$

Величина μ_e изменяется от -1 до +1; при $\mu_e = -1$ среда находится в состоянии обобщенного растяжения (по [2], простое растяжение); при $\mu_e = 0$ среда находится в состоянии обобщенного сдвига (по [2], чистый сдвиг); при $\mu_e = 1$ среда находится в состоянии обобщенного сжатия (по [2], простое сжатие);

- удельные работы деформации объема A_v и формы A_f определяются соответственно по формулам

$$A_v = \frac{1}{2} k \theta^2, \quad A_f = \frac{1}{3} \left[(e_3 - e_2)^2 + (e_2 - e_1)^2 + (e_1 - e_3)^2 \right], \quad (4)$$

где k - модуль всестороннего сжатия; μ - модуль сдвига.

Поскольку, как было отмечено выше, формулы (1) получены для модели среды в виде тела Гука, то карты линий равных значений A_v и дилатации подобны. Если среда находится в гидростатически напряженном состоянии ($e_1 = e_2 = e_3$), то $A_f = 0$. С помощью формул (4) можно оценить, в каком соотношении находятся упругие энергии объема- и формоизменения деформационного процесса: способствует ли он изменению объема среды или развитию в ней сдвиговых дислокаций.

Исходными данными для оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды района г. Екатеринбурга послужили результаты гравиметрической съемки в виде карты локальных аномалий силы тяжести в редукции Буге (региональный фон на исследуемой территории описывается полиномом 2-й степени ($\Delta g_{\phi} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2$) в масштабе 1:200000 и геолого-геофизические представления об основных плотностных неоднородностях района - интрузивных массивах - Уктусском, Шувакишском, Широкореченском, Шарташском, Верх-Исетском и Свердловском (Копанев, Калугина, Стороженко и др., 1999) (рис. 1).



Рис. 1. Локальное поле силы тяжести района г. Екатеринбурга

1 – изоаномалы нулевые; 2 – изоаномалы положительные; 3 – изоаномалы отрицательные; 4 – граниты; 5 – габброиды; 6 – гранитоиды.

Контуры массивов интрузивных пород: I – Верх-Исетский; II – Шувакишский; III – Уктусский; IV – Шарташский; V – Широкореченский

Уктусский массив изометричен в плане (10x12 км), сложен дунитами и различными видами габбро; контакты с вмещающими породами тектонические, круто падающие под массив; в поле силы тяжести массив картируется положительной аномалией интенсивностью более 35 мГал; по результатам интерпретации массив имеет воронкообразную форму, его размеры по вертикали оцениваются в 6-8 км. **Шувакишский массив** вытянут в меридиональном направлении (17x4 км), сложен в основном габбро; контакты с вмещающими породами тектонические встречного восточного и западного падений под углами 65-75°; в поле силы тяжести массив картируется положительной аномалией интенсивностью более 15 мГал; вертикальный размер массива около 4,5 км. **Широкореченский массив** имеет сложную в плане форму, его площадь на уровне эрозионного среза около 50 км²; сложен на три четверти габбро и подчиненными им пироксенитами; контактирует со Свердловским сателлитом Верх-Исетского гранитного плутона; в поле силы тяжести массив не выражен локальной аномалией. **Шарташский массив** изометричен в плане (6,5x8,0 км), почти полностью сложен гранитами; в поле силы тяжести картируется отрицательной локальной аномалией интенсивностью более 25 мГал; по результатам интерпретации массив представляет собой фрагмент Большого Шарташского плутона, имеющего сложную в плане форму и субширотную ориентировку; вертикальные размеры плутона около 5 км. **Верх-Исетский батолит** является самым крупным геологическим объектом в районе и одним из самых крупных гранитоидных плутонов на восточном

склоне Урала; его размеры по простиранию в меридиональном направлении около 80 км, вкrest простирания - около 30 км; нижняя кромка массива находится на глубине 9 км; по форме - это типичный антиклиналь - плутон; контакты погружаются в сторону от массива под углами $65-85^\circ$, местами они вертикальные и очень редко, когда они погружаются под него; плутон сложен гранитами трех магматических комплексов; в общую структуру плутона входят отдельные массивы, некоторые из них, как, например, Свердловский, сложенный среднезернистыми гранитами, представляют самостоятельные тела; в пределах исследуемой территории Верх-Исетский плутон картируется отрицательной аномалией силы тяжести интенсивностью более 30 мГал; интенсивность локальной отрицательной аномалии Свердловского массива около 20 мГал.

На рис. 2 приведена карта первого (e_1) и второго (e_2) главных значений. Ориентировка стрелок на рисунке соответствует ориентировке главных осей деформации, которые лежат в горизонтальной плоскости. Поле e_1 и e_2 более дифференцировано, чем поле силы тяжести. Каждый массив в этом поле картируется однозначно только ему присущей аномалией деформации. Легкие гранитные массивы "всплывают" в более плотной вмещающей среде. Поэтому оба компонента деформации являются для них относительными растяжениями. Ультраосновные массивы, более плотные по сравнению с вмещающей средой, "погружаются" в неё. Оба компонента деформации для них являются относительными сжатиями. Особенно четкой, изометричной, интенсивной аномалией характеризуется Уктусский массив. В южной части Шувакишского массива из-за влияния Свердловского массива компонент e_1 представляет растяжение. Различаются по ориентировкам и знакам компоненты e_1 и e_2 в северной и южной частях Верх-Исетского массива. В восточной части района (на севере и юге) есть два локальных участка (по существу полюса) с нулевыми значениями e_1 и e_2 .

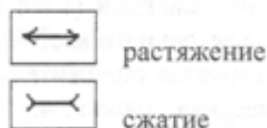
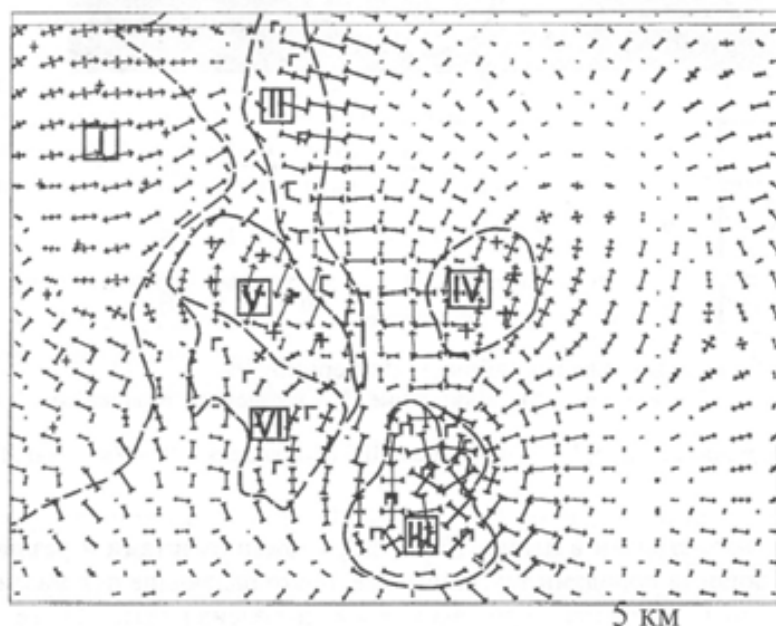


Рис. 2. Поле главных компонент деформации e_1 и e_2

Между дилатацией и силой тяжести наблюдается прямая зависимость. Изолинии полей Δg и θ до некоторой степени подобны (см. рис. 1 и рис. 3). Но в поле дилатации массивы картируются отчетливее, чем в поле Δg . Контур Верх-Исетского плутона и его сателлита Свердловского массива удовлетворительно совпадает с изолинией $\theta=0$; максимальное значение дилатации этих объектов превышает $100 \cdot 10^{-4}$. Изометричной аномалией с интенсивностью более $150 \cdot 10^{-4}$ картируется Шарташский массив. Всем ультраосновным массивам района присущи отрицательные аномалии

дилатации. Контур Уктусского массива совпадает с изолинией $\theta = -150 \cdot 10^{-4}$; максимальная же величина θ для этого массива превышает $-250 \cdot 10^{-4}$. Четкой аномалией θ интенсивностью более $150 \cdot 10^{-4}$ картируется Шувакишский массив. Ширококоренский массив не имеет отчетливого выражения в поле θ , как, впрочем, и в других полях.

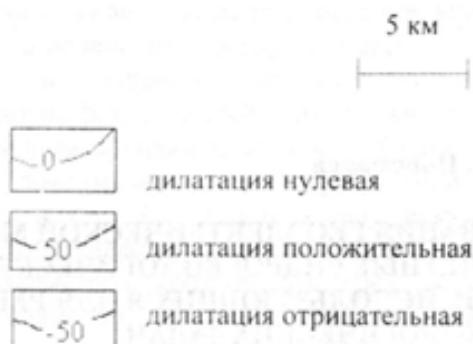
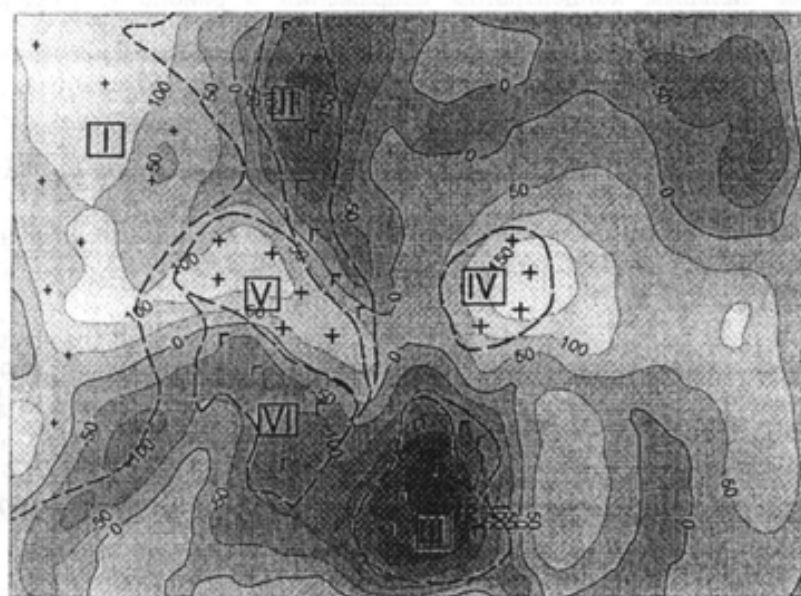


Рис. 3. Поле дилатации

Поле значений коэффициента μ_e сложное мозаичное. Локальные участки положительных (растяжение) и отрицательных (сжатие) значений μ_e разделены узкими кольцевыми зонами нулевых значений. Некоторые из этих локальных участков не совпадают в плане с массивами. Четкими аномалиями $\mu_e > -0,5$ картируются Уктусский и Свердловский массивы; для Шувакишского массива $\mu_e \approx 0,5$; для Ширококоренского и Шарташского - $\mu_e \approx 0$; северный и южный фрагменты Верх-Исетского плутона отличаются по величине μ_e : северный фрагмент ограничен узкими зонами со значениями $\mu_e > -0,5$; южный фрагмент почти целиком характеризуется $\mu_e > -0,5$.

Наибольший уровень удельной работы деформации формы характерен для Уктусского массива. Ее величина здесь превышает $40 \cdot 10^{-3}$ относительных единиц. Максимальные значения A_f других массивов вдвое меньше: для Верх-Исетского плутона $A_f \approx 14 \cdot 10^{-3}$, для Шувакишского и Свердловского - около $18 \cdot 10^{-3}$, для Шарташского - более $20 \cdot 10^{-3}$, для Ширококоренского - более $12 \cdot 10^{-3}$.

В первой формуле (4) квадрат дилатации в первом приближении равен $2(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2)$. Отсюда следует, что удельные работы объем- и формоизменения индифферентны к типу деформации - растягивающая она или сжимающая. Их соотношения определяются величинами модуля всестороннего сжатия и модуля сдвига, т. е. от вещественного состава деформируемой среды. Этот вывод подтверждается результатами выполненных нами расчетов A_v и A_f .

Тектонофизический анализ поля силы тяжести г. Екатеринбурга показал:

- 1) в полях параметров деформации (главные значения ϵ_{r1} и ϵ_{r2} , дилатация, коэффициент μ_e , удельные работы A_v и A_f) интрузивные массивы картируются более отчетливо и однозначно, чем в локальном поле силы тяжести даже при самых неблагоприятных условиях, когда массивы контактируют между собой. Каждому массиву присущ свой набор параметров деформации;
- 2) наиболее сильным концентратом напряжений в районе г. Екатеринбурга является Уктусский массив.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сейсмические события Уральского региона за 1914-2002 гг.** М.: ЦСГНЭО РАО "ЕЭС РОССИИ", 2002. 86 с.
2. **Трубицын А.П.** Неровность 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.
3. **Филатов В.В.** Теория и практика геодинамического анализа гравитационного поля (на примере рудных районов Урала): Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Свердловск, 1990. 376 с.
4. **Болотнова Л.А., Гуськов С.И.** Методика тектонофизического анализа гравитационного поля (на примере территории г. Екатеринбурга) // Пятая Уральская молод. научная школа по геофизике. Екатеринбург, 22-26 марта 2004 г. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 7-9.
5. **Николаев П.Н.** Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 293 с.

УДК 622.02:550.3:556.33

Е.И. Пономарев

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРНОГО МАССИВА В ОТЧЕТНЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕСЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Проектирование и строительство крупных горно-технических комплексов – карьеров, шахт, хвостохранилищ, горно-обогатительных предприятий и т. д. - связаны с необходимостью учета гидрогеологической и геомеханической ситуации в районе проектируемого строительства.

Анализ результатов эксплуатации горных комплексов на примере месторождений Восточной Сибири (Коршуновский ГОК) и Оренбургской области (Гайский ГОК, Ормет и т. д.) показывают, что большинство осложнений, связанных с устойчивостью бортов карьеров, вызвано недоучетом исходного комплекса взаимосвязанных гидрогеологических и геомеханических параметров и мелкомасштабной гидрогеологической и геомеханической ситуации в районе строительства горных предприятий.

Взаимосвязь геомеханических, гидрогеологических и геоэлектрических полей, явлений и параметров основана на фактическом структурно-вещественном совпадении (пространственном и вещественном) элементов геомеханических, гидрогеологических и геоэлектрических неоднородностей. Если в композитной среде наблюдается совпадение структурно-вещественных элементов геомеханических, гидрогеологических и геоэлектрических неоднородностей, то связь между параметрами (геомеханическими, гидрогеологическими и геоэлектрическими) имеет место. Если элементы не совпадают, то связи нет. Совпадение структурно-вещественных элементов неоднородностей свидетельствует только о наличии связи.

Величина и особенности сочетания неоднородностей определяют вид и контрастность взаимосвязей геомеханических, гидрогеологических и геоэлектрических полей, явлений и параметров.