

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СДВИГОВЫЕ ЗОНЫ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

ФИЛАТОВ В. В., БОЛОТНОВА Л. А.

Месторождения и рудопроявления различных полезных ископаемых генетически и пространственно связаны с геологическими структурами. Поэтому поиски и разведка месторождений невозможны без их картирования, изучения внутреннего строения и определения механизма образования. Среди многообразия геологических структур большое значение имеет изучение горизонтальных сдвигов, к определенным частям которых может быть приурочена рудная минерализация. Рассмотрение структурного парагенезиса сдвиговых зон и их плотностной характеристики показало, что эффективным методом изучения таких зон является гравиразведка. Этот метод позволяет однозначно картировать зоны сдвига в поле силы тяжести и определять их внутреннее строение, особенно в закрытых районах. В статье рассмотрено петроплотностное обоснование применения гравиразведки для изучения сдвиговых зон, приведены примеры их картирования для различных районов Урала.

Ключевые слова: гравитационное поле; сдвиговая структура; Томинская рудная зона; Дуринский прогиб.

Горизонтальные сдвиговые зоны (как и зоны разрывов других генетических типов) являются трехмерными геологическими объектами со сложным внутренним строением. При формировании горизонтального сдвига в зоне его динамического влияния в результате перераспределения механических напряжений создаются условия для образования различных вторичных разрывных и складчатых структур. Вопросам изучения напряжений, процессов деформирования и вторичного структурообразования в сдвиговых зонах посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [1–7].

Проанализировав результаты многочисленных опытов физического моделирования, С. С. Стоянов [2] установил минимальный набор структурных элементов, или структурный парагенезис, который может образоваться в зоне сдвига. К элементам структурного парагенезиса он отнес: два сопряженных скола R и R' ; трещины отрыва T , которые ориентированы при упругой деформации под углом 45° к направлению сдвига; эшелонированные складки Fd , образующиеся при деформировании слоистых сред; обратные косые P и продольные L сколы, характерные для заключительной стадии процесса сдвигообразования.

Результаты изучения внутреннего строения сдвиговых зон в земной коре и данные физического моделирования свидетельствуют, что в обоих случаях фор-

Филатов Владимир Викторович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой сопротивления материалов. 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, Владимирский государственный университет.

Болотнова Любовь Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: L.bolotnova@yandex.ru

мируются не все элементы структурного парагенезиса. Примером неполного развития сдвигового парагенезиса является зона сдвига, активизировавшегося в одном из районов Спитакского землетрясения в 1988 г. (рис. 1). При картировании этой зоны были установлены только трещины отрыва T , эшелонированные складки Fd и трещины скола R .

В [8] исследование сдвигового процесса выполнено на моделях из глинистой пасты, выявлено две стадии деформирования: пликативная и дизъюнктивно-пликативная. Во второй стадии происходит формирование двух систем трещин: поперечной, простирание которой составляет угол около 85° с осевой линией сдвига, и диагональной, образующей с той же осевой линией угол $15^\circ\text{--}30^\circ$. Обе системы состоят из совокупности более мелких трещин (первичных), по которым происходит смещение.

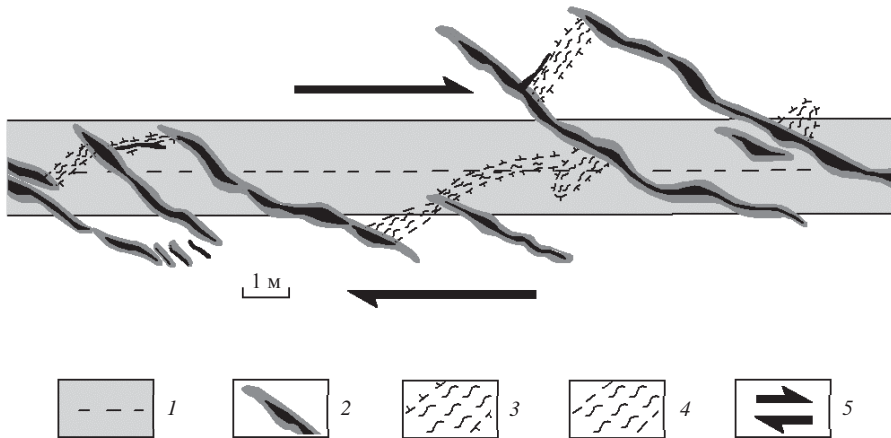


Рис. 1. Структурный парагенезис зоны сдвига по результатам полевых наблюдений в районе Спитакского землетрясения 1988 г. (по Е. А. Рогожину и др., 1990): 1 – осевая линия разлома; 2 – трещины зияющие (трещины отрыва T); 3 – валы вспучивания с трещинами (эшелонированные складки Fd); 4 – трещины без смещения (трещины скола R); 5 – направление сдвига

Более высокая детальность исследований, описанных в [8], позволила проследить динамику развития сдвиговой зоны как процесс слияния первичных трещин в крупные трещины.

При этом плоскости падения укрупненных поперечных трещин в осевой части сдвига вертикальные, а на периферии происходит их выполаживание и они приобретают «пропеллерообразную» форму. Диагональные трещины, возникая позже поперечных и получая интенсивное развитие, характеризуются такой же плоскостью падения, что и поперечные.

По данным исследований, выполненных на моделях из глины, влажного песка и петролатума со стеарином и некоторых других материалов, было установлено формирование вдоль линии будущего сдвига системы кулисообразно расположенных S -образных трещин отрыва, которые в процессе сдвигообразования объединяются в волнистый разрыв, представляющий собой чередование участков растяжения и сжатия [1]. Эти результаты подтверждаются исследованиями на моделях из пиррофиллита [9].

По [7] сдвиговая зона состоит из антиклинальных и синклиналиных складок, располагающихся по одну или обе стороны от осевой линии сдвига, которые могут нарушаться нормальными сбросами. Эти сбросы формируются в структурах растяжения. Поэтому они могут рассматриваться как трансформированные трещины отрыва.

Анализ результатов изучения сдвиговых зон на моделях и в реальных условиях позволил сделать выводы о закономерностях их развития и внутреннего строения.

1. Из элементов структурного парагенезиса развитие получают в основном трещины отрыва и скола, которые образуют упорядоченные кулисообразные последовательности однотипных структур, близких по форме и ориентировке и находящихся друг от друга на одинаковом расстоянии. Этот структурно-морфологический признак «является прямым указанием на развитие сдвигообразования» [6].

2. Трещины отрыва и скола состоят из большой совокупности более мелких первичных трещин, которые способствуют улучшению проницаемости геологической среды и росту ее дилатации на всю мощность слоя, вовлеченного в сдвиговый процесс [10]. В этих проницаемых участках деструкции, как в каналах, происходит транспортировка коровых и мантийных флюидов и формируются цепочки трубок взрыва [6], малых интрузивных тел гранитоидов [6], развивается эндогенный рудогенез [6] и другие геологические явления.

3. Проницаемые участки деструкции смещены от осевой линии сдвига на периферию сдвиговой зоны в сторону активного смещающегося крыла. Процесс трещинообразования в неподвижном крыле протекает с существенно меньшей интенсивностью [6, 11].

4. В закрытых районах элементы структурного парагенезиса проявляются в развитии пликативных структур в осадочном чехле, в увеличении пористости и проницаемости пород чехла над зонами интенсивного дробления пород фундамента [6].

5. Строение сдвиговых зон однотипно на всех масштабных уровнях – и для глубинных сдвигов, и для сдвигов более высоких порядков, возникающих в областях динамического влияния глубинных сдвигов как вторичные структуры [10].

Большая роль сдвиговых зон как структурно-рудоконтролирующего фактора предопределяет значительный интерес к их изучению. Картирование этих зон и изучение их внутренней структуры представляет немалые трудности даже в открытых районах. В закрытых районах важнейшая роль при изучении сдвигов принадлежит геофизическим методам, основным из которых является гравиразведка.

Физической основой применения гравиразведки для изучения сдвигов служит то обстоятельство, что трещинообразование, широко проявляющееся в сдвиговом процессе, приводит к значительному изменению плотности геологической среды. Плотности горной породы в образце и в массиве существенно различаются. Это различие хорошо выявляется при сопоставлении данных петроплотностных измерений с результатами определения плотности интегральными методами (регистрация интенсивности космического излучения в горных выработках, результаты гравитационного каротажа и др.).

Результаты детальных геолого-петрофизических исследований, выполненных в зонах динамического влияния Первомайского, Тальковского разломов Украины, Забайкалья и других регионов [3, 12], свидетельствуют о том, что основным механизмом пластических и хрупких деформаций пород является катаклаз, выраженный в дроблении зерен минералов и развитии микротрещиноватости. Благодаря этому процессу плотность пород уменьшается на $0,01\text{--}0,07\text{ г/см}^3$. Связь между плотностью пород и объемом открытых трещин хорошо описывается линейным уравнением регрессии [13]. В структурном отношении наиболее разуплотнены зоны развития трещин скола.

При изучении физических свойств тектонитов, развитых в сдвиговых зонах, к которым приурочены многие рудные месторождения Таджикистана, установлено, что в результате деформации практически не происходит изменения мине-

ральной плотности тектонитов. Значительное уменьшение плотности тектонитов (до $0,40 \text{ г/см}^3$) обусловлено только их трещиноватостью. При этом участки развития тектонитов генетически связаны с оруденением, а именно промышленная рудная минерализация находится в сдвиговой зоне, в местах распространения грубообломочных тектонитов большой мощности. В тонкодисперсных тектонитах – глинках трения – ее почти нет [6].

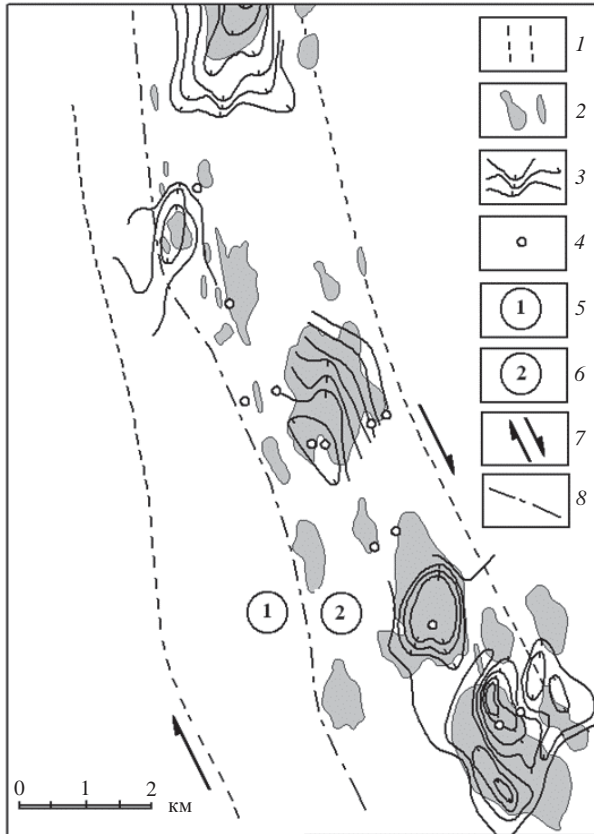


Рис. 2. Схема гравитационного поля и строения Томинской рудной зоны:

1 – границы зоны; 2 – контуры малых интрузивных тел; 3 – изолинии локальных аномалий силы тяжести; 4 – рудопроявления меди с содержанием 0,3 % и выше; 5 – положение пассивного крыла сдвиговой зоны; 6 – положение активного крыла сдвиговой зоны; 7 – направление сдвига; 8 – граница между пассивным и активным крыльями сдвиговой зоны

Таким образом, структуры отрыва и скола представляют собой аномальные по плотности объекты. Эти объекты, расположенные вдоль простирания сдвиговой зоны, имеют близкие размеры и эллиптическую форму в плане. Большие полуоси эллипсов параллельны и образуют острый угол с осью сдвига. Расстояние между эллипсами примерно одинаковое. В аномальном поле силы тяжести такому распределению плотностных неоднородностей соответствуют системы кулисообразных локальных отрицательных аномалий, близких по интенсивности, форме, размерам и ориентировке. Наличие систем таких аномалий служит надежным морфологическим признаком сдвиговой зоны. Благоприятным фактором для образования аномалий является то, что плотностные неоднородности имеют крутое

падение, а их нижние кромки находятся на значительной глубине, которая достигает мощности слоя, вовлеченного в сдвиговый процесс [13].

Примерами сдвиговых зон являются Томинская рудная зона, как фрагмент Биргильдинско-Томинского рудного узла на Южном Урале, и Дуринский прогиб по кровле солей на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей, природа, кинематический тип и внутреннее строение которых были в значительной мере установлены на основании морфологического анализа и интерпретации аномалий поля силы тяжести [14, 15]. Эти примеры дают представление не только об общих чертах морфологии поля силы тяжести сдвиговых зон, но и об их различиях, обусловленных разной реологической обстановкой, в которой формировались обе структуры. Томинская рудная зона сформировалась в вулканогенно-осадочной толще; она имеет северо-северо-западное простирание; ее ширина около 3–5 км, длина по простиранию около 25 км. В гравитационном и магнитном полях зона картируется характерным комплексом локальных аномалий. Разломы, ограничивающие структуру, фиксируются системами кулисообразных линейных магнитных аномалий, близких по интенсивности и размерам. Длинные оси этих аномалий параллельны друг другу и имеют северо-восточное направление. Аномалии обусловлены системами трещин отрыва, в которых развита прожилково-вкрапленная минерализация магнетита.

Гравитационное поле внутренних частей зоны характеризуется системой кулисообразно расположенных локальных отрицательных аномалий, близких по интенсивности. Форма аномалий близка к эллиптической; размеры в плане изменяются от 1,0 × 0,5 км до 2,0 × 1,0 км; длинные оси эллипсов параллельны и ориентированы в северо-восточном направлении под углом 40°–45° к простиранию осевой линии зоны – направлению сдвига; почти все аномалии смещены к северо-восточной границе зоны (рис. 2).

Результаты интерпретации аномалий силы тяжести и бурения показали, что источниками аномалий являются малые интрузивные тела диоритов, кварцевых диоритов и кварцевых диоритовых порфиритов, которые залегают в более плотных вулканогенных породах основного и среднего состава.

Центральные части тел штокообразные; интрузии сопровождаются апофизами; горизонтальные сечения интрузий близки к эллиптическим с размерами осей от 2,0 × 1,0 км до 2,0 × 0,5 км и с такой же ориентировкой, как у локальных аномалий силы тяжести. Нижние кромки интрузий, с которыми связано медно-порфировое оруденение, находятся на глубине первых километров. Породы интрузивных тел сильно раздроблены. Приведенные данные однозначно свидетельствуют о том, что Томинская зона представляет собой левосторонний сдвиг.

Дуринский прогиб по кровле солей Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей сформировался в иной реологической обстановке. Прогиб представляет собой наложенную структуру в зоне динамического влияния широтного глубинного разлома, пересекающего платформенную часть Приуралья и часть структур складчатого Урала.

Гравитационное поле прогиба повышенное по сравнению с соседними территориями. На этом фоне картируется цепочка кулисообразно расположенных положительных локальных аномалий S-образной формы. Интерпретация аномалий показала, что их источниками являются погружения в кровле солей, которые заполнены терригенным материалом, более плотным, чем соль. Бурение подтвердило этот вывод: погружения имеют S-образные в плане длинные оси и погружений, и аномалий, которые параллельны и вытянуты в северо-восточном направлении под углом 10°–20° к направлению простирания и прогиба, и разлома (рис. 3, а, б).

Если рассматривать морфологию поля силы тяжести, то кулисообразная система локальных аномалий и обусловившая их система локальных погружений образовались в результате левостороннего сдвига, который произошел по Дуринскому глубинному разлому. Этот вывод был подтвержден инструментальными измерениями по нивелировочным линиям Тюлькино–Чусовой и Серов–Кушва. Эти линии пересекают разлом, и в местах их пересечения отмечены аномалии сдвига шириной от 25 до 40 км.

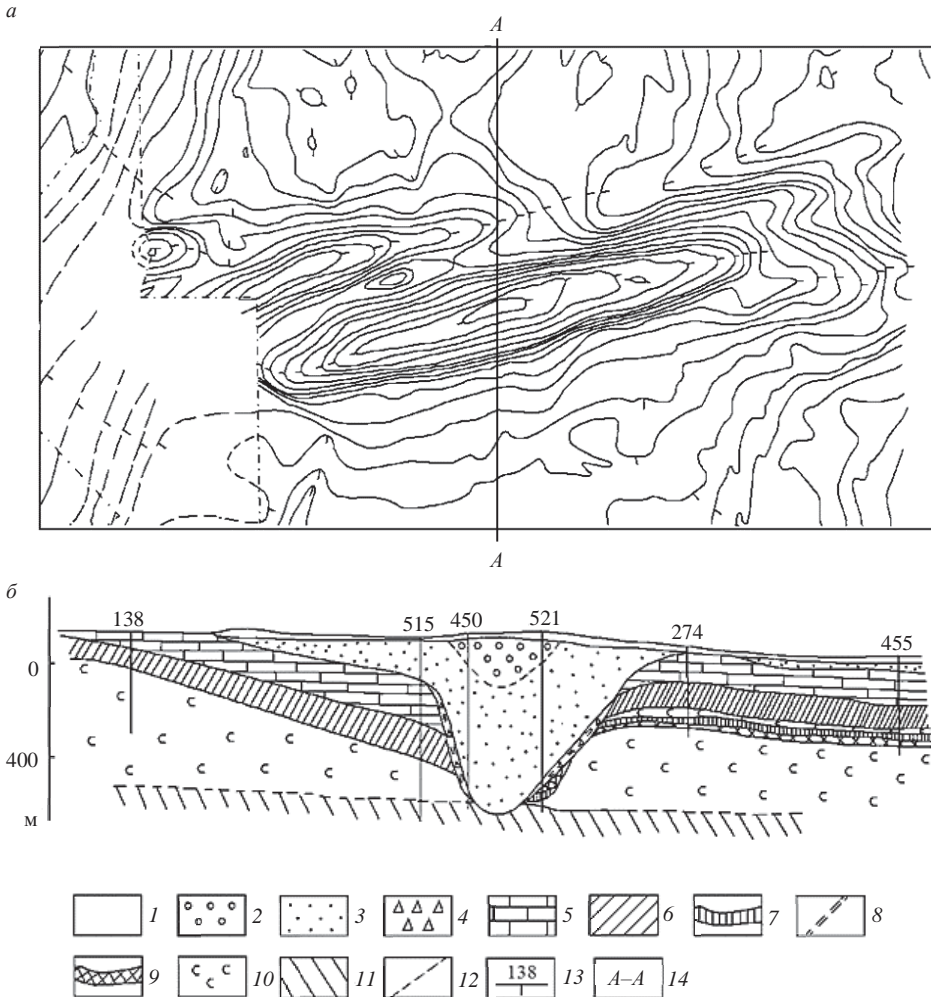


Рис. 3. Схема гравитационного поля – а и геологический разрез Дуринского прогиба – б:
 1 – четвертичные отложения; 2 – отложения белебеевской свиты; 3 – отложения шешминской свиты;
 4 – тектоническая брекчия; 5 – отложения верхнесоликамской подсвиты; 6 – отложения нижнесоликамской подсвиты; 7 – сильвинит-карналлитовая толща верхнепоповской подсвиты; 8 – зеркала скольжения; 9 – сильвинитовая толща верхнепоповской подсвиты; 10 – верхняя и нижняя галитовые толщи верхнепоповской подсвиты; 11 – нижнепоповская подсвита, галогенно-терригенно-карбонатная толща; 12 – линии тектонических подвижек; 13 – положение скважины и ее номер; 14 – линия разреза

Важнейшим вопросом установления генезиса прогиба является вопрос об образовании локальных погружений. Эти погружения образовались в результате выщелачивания калийных солей подсолевыми водами и рассолами с последующим заполнением пустот вышележащими плотными терригенными отложениями. Движение же подсолевых вод и рассолов происходило по зонам трещиноватости и разрыхления соляных пород в результате сдвигообразования.

Поэтому пространственно процесс выщелачивания происходил в прогибе не повсеместно, а выборочно, в соответствии с положением в зоне сдвига элементов структурного парагенезиса, прежде всего трещин скола и отрыва. Существенное различие в ориентировках больших осей локальных аномалий силы тяжести в Томинской зоне и в Дуринском прогибе обусловлено различием реологических обстановок, в которых формировались эти структуры. При образовании Томинской зоны породы при сдвигообразовании испытывали существенно упруго-пластические деформации. В такой ситуации, как следует из результатов физического моделирования и теоретического анализа, главные оси деформации образуют угол с направлением сдвига, близкий к 40° – 45° . В Дуринском прогибе главную роль играла пластическая деформация пород. В этом случае эллипсоид деформации становится сильно вытянутым с отклонением оси относительно упругой составляющей деформации на угол 20° – 25° . Поэтому в прогибе все системы трещин ориентированы под меньшими углами к направлению сдвига.

Обобщая качественные результаты тектонофизического анализа поля силы тяжести двух сдвиговых структур, можно сделать следующие выводы: гравиразведка является эффективным методом картирования сдвиговых зон, позволяющим однозначно определять знак сдвига, ширину сдвиговой зоны, положение ее активного и пассивного крыльев, внутреннее строение и реологические условия сдвигообразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
2. Стоянов С. С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.
3. Гинтов О. И., Исая В. М. Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. Киев: Наукова думка, 1988. 225 с.
4. Тяпкин К. Ф. Изучение разломных и складчатых структур докембрия геолого-геофизическими методами. Киев: Наукова думка, 1986. 168 с.
5. Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.
6. Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых: тез. докл. I Всесоюзн. совещ. по сдвиговой тектонике. Л.: 1988. Вып. 1. 95 с. Вып. 2. 108 с. Вып. 3. 144 с.
7. Спенсер Э. У. Введение в структурную геологию. Л.: Недра, 1981. 308 с.
8. Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
9. Соболев Г. А. Изучение образования и предвестников разрыва сдвигового типа в лабораторных условиях // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 86–99.
10. Стаховская И. Р. Трещинообразование и поверхностные деформации в зоне формирующегося сдвигового разрыва в образце горных пород // Изв. АН СССР. 1988. № 5. С. 88–94.
11. Лобацкая Р. М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.
12. Беличенко П. В., Исая В. М. Тектонофизическое изучение дилатансионных эффектов в Центральной части Украинского щита // Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии: тез. докл. II Всесоюзн. симпозиума. Киев: Изд-во ИГ АН УССР, 1987. С. 112–113.
13. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Гравиразведка. Метод тектонофизического анализа гравитационного поля. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 284 с.
14. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Природа и динамика Дуринского прогиба // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 4. С. 111–119.
15. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Генезис Томинской рудной зоны по геолого-геофизическим данным // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 5. С. 111–119.

Поступила в редакцию 16 ноября 2017 года

HORIZONTAL SHEAR ZONES AND THEIR REFLECTION IN THE GRAVITATIONAL FIELD

Filatov V. V. – Vladimir State University, Vladimir, the Russian Federation.

Bolotnova L. A. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation.

E-mail: L.bolotnova@yandex.ru

Deposits and ore occurrences of various minerals are genetically and spatially related to geological structures. Therefore, prospecting and exploration are impossible without their mapping, the study of the internal structure and determination of the mechanism of their formation. Among the large variety of geological structures, horizontal shifts are of great importance, to certain parts of which ore mineralization may be associated. The study of the structural paragenesis of shear zones and their density characteristics has shown that gravity measurements is an effective method of studying these areas. This method allows for an unambiguous mapping of the shear zone in the gravity field and studying their internal structure, especially in confined areas. The article considers petropolitanae rationale for the use of gravity measurements for the study of shear zones and gives examples of their mapping for different regions of the Urals.

Key words: gravitational field; shear structure; Tominsky ore zone; Durinski foredeep.

REFERENCES

1. Gzovskii M. V. *Osnovy tektonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 536 p.
2. Stoianov S. S. *Mekhanizm formirovaniia razryvnykh zon* [Mechanism of disjunctive zones formation]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 144 p.
3. Gintov O. I., Isai V. M. *Tektonofizicheskie issledovaniia razlomov konsolidirovannoi kory* [Tectonophysical investigation of disjunctive breaks of consolidated crust]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 225 p.
4. Tiapkin K. F. *Izuchenie razlomnykh i skladchatykh struktur dokembriia geologo-geofizicheskimi metodami* [The study of fault and orogenic structures of the Precambrian with the use of geological-geophysical methods]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 168 p.
5. Sherman S. I. *Fizicheskie zakonomernosti razvitiia razlomov zemnoi kory* [Physical law of development of Earth crust faults]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 102 p.
6. *Sdvigovye tektonicheskie narusheniia i ikh rol' v obrazovanii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: tez. dokl. I Vsesoiuzn. soveshch. po sdvigovoi tektonike* [Abstracts of the 1st All-Union conference on the shear tectonics "Shear tectonic disturbances and their role in mineral deposit formation"]. Leningrad, 1988, issue 1. 95 p. Issue 2. 108 p. Issue 3. 144 p. (In Russ.)
7. Spenser E. U. *Vvedenie v strukturu geologiiu* [Introduction into the structural geology]. Leningrad, Nedra Publ., 1981. 308 p.
8. Sherman S. I., Borniakov S. A., Buddo V. Iu. *Oblasti dinamicheskogo vliianiia razlomov* [Regions of the faults dynamic effect]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 112 p.
9. Sobolev G. A. [The study of the formation and the premonitory symptoms of a fault of a shear type in laboratory conditions]. *Fizicheskie protsessy v ochagakh zemletriaseni* [Physical processes in earthquake focuses]. Moscow, Nauka Publ., 1980, pp. 86–99.
10. Stakhovskaia I. R. [Fissuring and surface deformations in the zone of forming shear fault in a sample of rock]. *Izv. AN SSSR – News of the Academy of Sciences of the USSR*, 1988, no. 5, pp. 88–94. (In Russ.)
11. Lobatskaia R. M. *Strukturalnaia zonal'nost' razlomov* [Structural zonality of faults]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 128 p.
12. Belichenko P. V., Isai V. M. [Tectonophysical investigation of dilatancy effects in the Central part of the Ukrainian shield]. *Ekspiermental'naia tektonika v reshenii zadach teoreticheskoi i prakticheskoi geologii: tez. dokl. II Vsesoiuzn. simpoziuma* [Abstracts of the 2nd All-Union symposium "Experimental tectonics in solutions of the problems of theoretical and practical geology"]. Kiev, IM AS USSR Publ., 1987, pp. 112–113. (In Russ.)
13. Filatov V. V., Bolotnova L. A. *Gravirazvedka. Metod tektonofizicheskogo analiza gravitatsionnogo polia* [The method of tectonophysical analysis of gravitation field]. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 2015. 284 p.
14. Filatov V. V., Bolotnova L. A. [Nature and dynamics of Durinsky foredeep]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 4, pp. 111–119. (In Russ.)
15. Filatov V. V., Bolotnova L. A. [Genesis of Tomino ore zone according to geological and geophysical data]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 5, pp. 111–119. (In Russ.)