

ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИЙ НА МИГРАЦИЮ ФЛЮИДОВ В СФЕРЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Т. М. Злобина*, член-корреспондент РАН В. А. Петров,
К. Ю. Мурашов, А. А. Котов

Поступило 25.07.2018 г.

На двух месторождениях изучены механизмы палеодеформаций периода поступления флюидов в сферу накопления концентраций золота. Установлено, что эти механизмы соответствуют сейсмическим механизмам DC- и NDC-типов. Основное влияние таких механизмов деформаций на миграцию флюидов состоит в том, что они формируют в сфере накопления рудных концентраций различную, зависящую от параметров флюидного режима структурно-гидродинамическую организацию рудообразующей системы и контролируют потоки флюидов.

Ключевые слова: механизмы палеодеформаций, механизмы, соответствующие сейсмическим механизмам DC- и NDC- типов, миграция флюидов, структурная и гидродинамическая организация системы, параметры флюидов золоторудных месторождений.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484187-92>

В соответствии с сейсмогенной концепцией образования гидротермальных месторождений золота восходящая миграция флюидов в зонах разломов осуществляется при превышении сейсмического девиаторного напряжения над литостатическим давлением в области генерации гидротермального источника. Модель клапанного механизма [1] учитывает влияние сейсмических эффектов на циклическую взаимосвязь между поровым и литостатическим давлением, объёмом поступающих в разлом флюидов. По “модели роевых землетрясений, инициированных напорными флюидами” [2] накопление концентраций руд происходит при циклическом внедрении напорных, насыщенных газами флюидов, вызывающем события роевых землетрясений с магнитудами менее 4. В процессе тысяч эпизодов роевой сейсмичности месторождения формируются за 10^4 – 10^5 лет. Однако влияние различных зависящих от структуры очага землетрясения сейсмических механизмов деформаций на распределение флюидных потоков в сфере накопления золоторудных концентраций не рассматривалось, а изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) среды под воздействием ювенильных флюидопотоков уделяется пока ещё мало внимания.

Стандартные механизмы, развивающиеся в очаге землетрясения по модели двойного диполя (Double Couple — DC), обеспечивают подвижку по единственной плоскости разрыва. Каждая подвижка (сдвиг, надвиг, взброс или сброс) обуславливает индивидуальный режим изменения НДС среды, ответственный за образование своей трещинной инфраструктуры. Внедрение новых методов [3] оценки волновой картины сейсмического поля с помощью тензоров центраида сейсмического момента (Centroid Moment Tensor — CMT) позволило выявить новый механизм, не соответствующий DC-модели очага, напряжения которого реализовывались на одновременное образование разрывов по нескольким плоскостям. Такой механизм, обусловленный центроидным расположением векторов главных нормальных напряжений (σ_1 , σ_2 , σ_3), принято связывать с недвухдипольной (Non Double Couple — NDC) моделью разгрузки сейсмического очага сложной структуры, свойственной некоторым глубокофокусным землетрясениям, с гипоцентрами в мантии или в зоне Бенъофа. Однако с помощью предложенного [4] критерия были выявлены механизмы NDC-типа и в коре среди сейсмических механизмов DC-типа.

Влияние различных механизмов деформаций на миграцию рудообразующих флюидов в сфере накопления концентраций золота изучено на Вернинском и Ирокиндинском мезотермальных месторождениях (рис. 1), различающихся глубинами

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

* E-mail: tatiana1946@yandex.ru

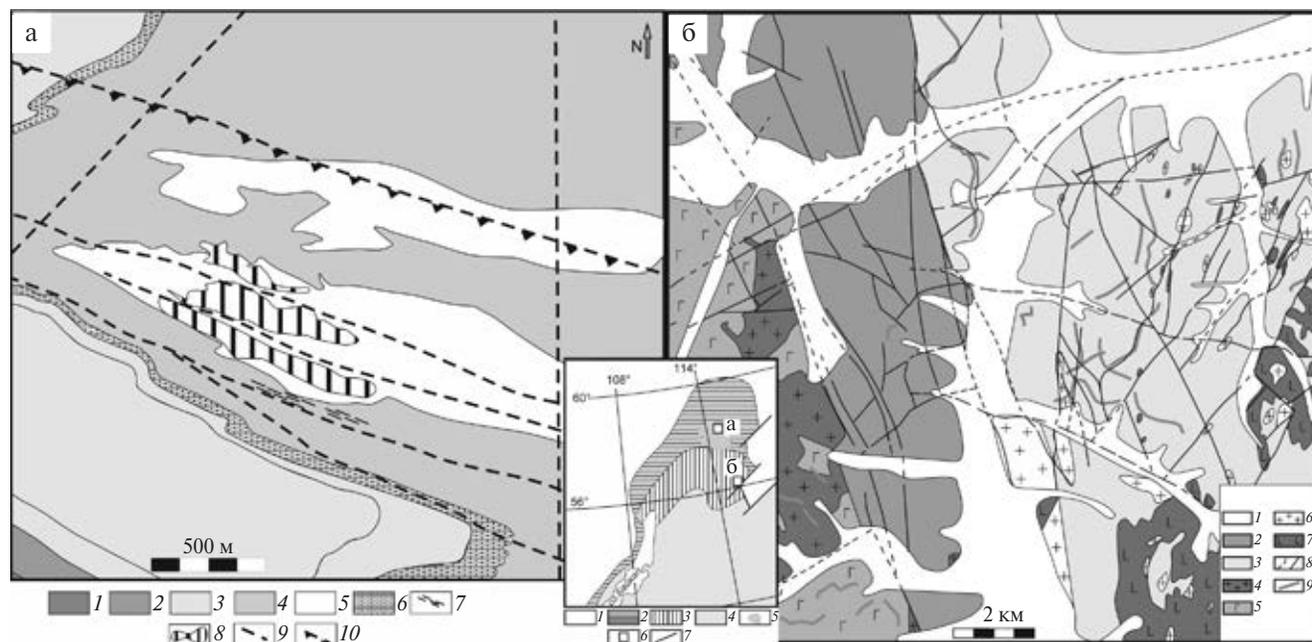


Рис. 1. Геолого-структурные схемы Вернинского (а) и Ирокиндинского (б) месторождений. На врезке: 1 — Сибирский кратон, 2 — БПП, 3 — БМП, 4 — Баргузинский супертеррейн, 5 — Бодайбинский синклиниорий, 6 — позиция месторождений, 7 — разломы. а: метаморфизованные осадочные породы свит: 1 — ангарской (PR₃an), 2 — вачской (PR₃vc), 3–6 — аунакитской (PR₃au); 3, 4, 5 — чередование высокоуглеродистых филлитовых сланцев, слабоуглеродистых алевролитов, песчаников; 6 — горизонт известняков; рудные тела: 7 — жильные, 8 — прожилково-вкрапленные; 9 — разломы; 10 — зона надвигов. б: 1 — четвертичные отложения (Q); 2 — метатерригенные породы аматканской свиты (R–V?) палеотроговой мобильной зоны; 3 — гнейсы киндиканской свиты (AR[?]kn); 4–7 — интрузивные комплексы: 4 — бамбукойский (PR₂?–R₃bm?) — гранитоиды; 5 — кедровский (PR₂) — габброиды; 6, 7 — муйский (PR₁ms): 6 — гранитоиды, 7 — габброиды; 8 — разломы; 9 — жильные зоны.

формирования гидротермальных источников и динамическими режимами функционирования проводящих разломов. Месторождение Вернинское размещено в центральной части Байкало-Патомского пояса (БПП, см. рис. 1а) и локализовано в покровно-складчатой черносланцевой толще байкалид Бодайбинского синклинория, сформированного над палеорифтом. Его формирование связано с поступлением флюидов в динамическом режиме активизации субширотной зоны надвигов, образовавшихся поперечно к простиранию палеорифта. С этим региональным режимом парагенетически связаны деформации сдвигов вдоль субмеридиональных разломов, скрытых под надвигами [5]. Ирокиндинское месторождение размещено на восточной окраине Байкало-Муйского пояса (БМП), вблизи юго-западной краевой части Сибирского кратона и локализовано как в архейских гнейсах кратонного выступа (Южно-Муйская глыба) в среде орогенных байкалид, так и в породах интрузивных комплексов Байкало-Муйского пояса (см. рис. 1б). Накопление рудных концентраций Ирокиндинского месторождения происходило при поступлении флюидов в сферу рудоотложения из глубинных северо-западных

разломов, активизация которых в режиме сдвигов вызвала также сдвиговые подвижки вдоль сопряжённых с ними северо-восточных разломов второго порядка. В условиях транспрессии вдоль северо-восточных разломов образована структура “пальмы”, верхушку которой представляли эшелонированные дивергентные надвиги северо-восточного простирания, сформировавшие в дальнейшем протяжённые структурные зоны, где локализованы жилы различной ориентировки и морфологии [6].

Для решения задачи соблюдены следующие правила оценки: 1) соответствия во времени процессов палеодеформаций и миграции флюидов; 2) адекватности механизмов палеодеформаций сейсмическим механизмам DC- или NDC-типов. Реконструкция векторов главных нормальных напряжений (σ_1 , σ_2 , σ_3) и деформаций (A , B , C) производилась в области влияния потенциального проводящего разлома по динамопарам тангенциальных сколов [7], выполненных рудными прожилками. Множество таких частных переменных векторов напряжений и деформаций характеризуют НДС среды, вызванное определённой подвижкой по разлому в период поступления флюидов.

Изменчивость частных переменных ориентировок векторов A , B , C в пределах локального НДС среды отражают на сферограммах изолинии плотности их распределения (в %). Доверительные интервалы распределения векторов на сфере определены (также в %) с помощью критерия [8]. Количественная оценка локальных и общего НДС среды осуществлялась методом [9], который позволяет провести классификацию механизмов деформаций по оценкам собственных значений детерминантов ($\text{Det}M_{i,j}$) тензоров-девиаторов, отражающих на сфере изометрическое положение плоскостей разлома и связанных с подвижкой по нему систем трещин относительно базисной системы координат. Асимметрия тензоров напряжений рассчитана методом [10].

Схожим принципом геометрической типизации обладает “Классификация тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу” [11]. Она разработана с использованием $\text{Det}M_{i,j}$ СМТ, определяющих как волновое сейсмическое поле, так и поле остаточных смещений. Схема классификации определяет допустимые области на сфере как для стандартных типов ДС-механизмов (сдвиг, взброс, сброс и др.) и НДС, более сложного, чем подвижка по плоскому разрыву, так и области необратимых механизмов деформаций НДС-типа. Задача об установлении адекватности палеомеханизмов деформаций тем или иным сейсмическим механизмам решалась путём нахождения на сфере классификации фокальных сейсмических механизмов [11] области, допустимой для палеодеформаций. Получены следующие результаты. При формировании Вернинского месторождения флюиды поступали в зону широтного надвига и в субмеридиональные разломы в условиях нестабильности поля напряжений. На это указывают вариации оценок σ_1 , σ_2 , σ_3 и асимметрия тензоров напряжений. Установлена инверсия векторов напряжений $\sigma_2 \leftrightarrow \sigma_3$ и деформаций $B \leftrightarrow C$ (рис. 2, I): в субмеридиональном направлении $B_1 \leftrightarrow C_2$, и $B_2 \leftrightarrow C_1$, в субширотном $B_3 \leftrightarrow C_4$ и $B_4 \leftrightarrow C_3$. При этом частные векторы B_1 и B_2 с максимальной плотностью распределения лежат в плоскостях сместителей субмеридиональных разломов, а векторы B_3 и B_4 в плоскостях сместителей субширотных разломов зоны надвигов. Такая деформационная обстановка свидетельствует о возвратных дислокациях “маятникового” типа. Вдоль крутых субмеридиональных разломов правые сдвиги сменялись левыми, а вдоль пологих субширотных разломов надвигание с севера на юг сопровождалось сменой левой сдвиговой компоненты на правую. Вместе с этим простираение пояса максимумов пологих векторов растяжения (σ_1) практически

полностью соответствует субширотной зоне надвигов (рис. 2, I, A). Это позволило дать следующую интерпретацию общей картины деформаций в период поступления флюидов. Дискретно-непрерывное региональное надвигание покровных толщ с севера на юг вызвало качание плоскостей B_1C_1 и B_2C_2 деформаций, согласных с простираемостью скрытых глубинных разломов субмеридиональной системы, что, в свою очередь, обеспечило раскрытие нарушений надвиговой зоны и проявление вдоль них переменной сдвиговой компоненты.

Расчётные оценки тензоров-девиаторов палеонапряжений месторождения Вернинское показали, что в целом тензоры можно отнести на схеме классификации [11] (рис. 3) к области допустимых значений для механизмов надвигов с косыми лево- и правосторонними сдвигами с неустойчивым, но обратимым НДС среды. Вместе с данными по стереографическому анализу это означает, что механизм палеодеформаций схож с сейсмическим механизмом простого ДС-типа, обусловленным перераспределением в очаге землетрясения напряжений между σ_1 и σ_3 , через σ_2 (коллинеарное B). При такой посреднической роли σ_2 максимальное трещинное разрушение в зоне разломов и их

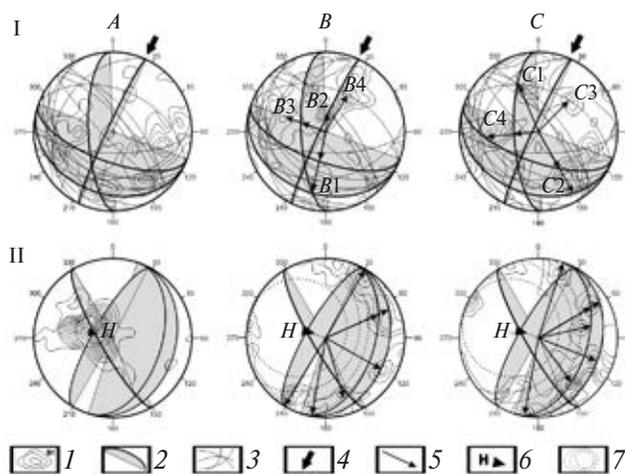


Рис. 2. Сферограммы, характеризующие НДС среды в период накопления рудных концентраций месторождений Вернинское (I) и Ирокиндинское (II). Все проекции на верхнюю полусферу сетки Шмидта. 1 — изолинии плотности распределения (0,5; 1,0; 1,5; 2,0, ..., 7%) векторов деформаций A , B , C , коллинеарных векторам напряжений $A(\sigma_1)$, $B(\sigma_2)$, $C(\sigma_3)$, где σ_3 — максимальное сжатие, σ_1 — минимальное, σ_2 — промежуточное; 2 — плоскости разломов и надвиговых зон; 3 — проекции жил и прожилков; 4 — направление регионального сжатия; 5 — векторы B и C деформаций, лежащие в плоскостях тектонических нарушений; 6 — ось симметрии системы деформаций; 7 — проекции сечений аппроксимирующих конусов Бингхема.

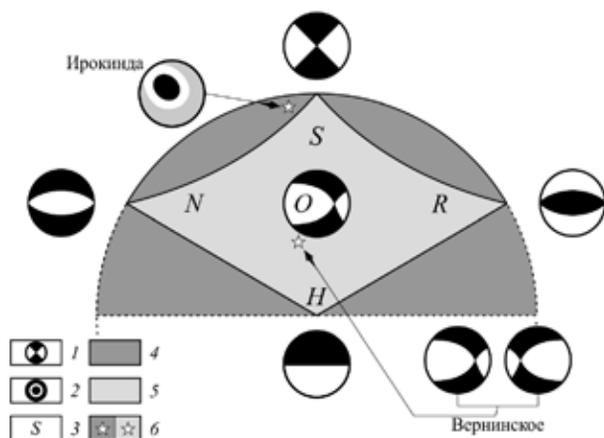


Рис. 3. Схема классификации фокальных механизмов на основе изометрического отображения на сферу (СМТ) (по [11] с добавлениями). Диаграммы фокальных механизмов: 1 — DC-типа (чёрное σ_1 — растяжение, белое σ_3 — сжатие); 2 — NDC-типа (чёрное — σ_1 , серое — поясное распределение σ_2 и σ_3 , белое — деформационная тень); 3 — типы подвижек DC-механизмов: S — сдвиг, R — взброс, N — сброс, H — взрез, O — сдвиго-надвиг; 4, 5 — области допустимых значений, в которые отображаются все СМТ, 5 — область запрета для фокальных DC-механизмов, которым отвечают необратимые тензоры с $\text{Det}M_{ij} = 0$; 6 — место на схеме палеомеханизмов месторождений.

повышенная проницаемость должны теоретически совпадать с направлением векторов B деформаций, вдоль которых сопрягаются все динамопары мелких сколов. С этой точки зрения все сдвиги и надвиги месторождения Вернинское, в плоскостях сместителей которых лежат частные векторы B с максимальной плотностью распределения, являются флюидопроводящими. Термобарометрические параметры флюидов месторождения Вернинское (давления не превышают 3 кбар и температуры 356—252°C), полученные по флюидным включениям в золотоносном кварце [12], соответствуют глубине 8—9 км. Учитывая эти данные и изменения направления действия σ_3 на противоположное, “маятниковый” механизм деформаций способен работать в насыщенной флюидами среде как насос, обеспечивая подкачку флюидов под давлением 2—3 кбар из источников по глубоким меридиональным разломам в сдвиго-надвиговую зону сферы накопления рудных концентраций. Направление потоков соответствует здесь частным ориентировкам осей B и C деформаций.

Поступление флюидов в зоны разломов при формировании Ирокиндинского месторождения происходило в режиме преобразования поля напряжений сдвига в центроидное. Пульсирующее поле напряжений одноосного переменного

сжатия-растяжения ($\sigma_3 = \sigma_2 > \sigma_1 \leftrightarrow \sigma_3 = \sigma_2 < \sigma_1$, $\sigma_3 \leftrightarrow \sigma_1$), характеризуется вариациями коэффициентов асимметрии тензоров, изменилось на более устойчивый режим одноосного растяжения ($\sigma_1 > \sigma_3 = \sigma_2$). Минимальная асимметрия тензоров напряжений обобщающих выборок ($k_1 \ll k_2 \approx 0$) указывает на быструю стабилизацию динамической системы. Поэтому напряжения пульсирующего одноосного сжатия слабо отразились на общей статистике параметров синрудных деформаций. Устойчивый режим обусловил чётко структурированную картину конических деформаций с замкнутым поясным распределением максимумов пологих векторов C и B (при $\sigma_3 \approx \sigma_2$) по дугам малых кругов стереографической сетки и полярным концентрированным распределением частных векторов A вблизи оси H (рис. 2, II). Однако ось H имеет ориентировку (азимут 110°, угол падения 60°), не совпадающую с ориентировками частных векторов A . Ось H является осью симметрии конической системы деформаций, которая не согласуется с кинематикой сдвигов по разломам. Структурный парагенезис трещин, вместивших жилы Ирокиндинского месторождения, отличается от парагенезиса сдвига [13] присутствием: пологих сдвигов с поворотом, плоскости которых ориентированы нормально к H ; крутых радиальных и конических сколов, расходящихся от H ; косых тангенциальных сколов по многим плоскостям, касательным к поверхности конуса и “крутящихся” вокруг H [14]. Все элементы такого структурного парагенезиса, усложнившие внутреннее строение зон разломов и надвигов, пересекаются в точке сопряжения с осью H , создавая здесь максимальное разрушение и повышенную проницаемость. Поскольку ось симметрии H системы деформаций совпадает с линией сопряжения разломов северо-западного и северо-восточного простираний (рис. 2, II), эти разломы можно уверенно отнести к флюидопроводящим. Дивергентные надвиги структурных зон раскрылись в период поступления флюидов, что связано с растяжением (рис. 2, II, A), действовавшим нормально к плоскостям сместителей, в которых лежат веером частные векторы C и B деформаций (рис. 2, II, C и B) с максимальной плотностью распределения.

Тензор-девиатор, характеризующий общие деформации Ирокиндинского месторождения, соответствует на схеме классификации [11] (см. рис. 3) области, близкой к сдвигу, но запретной для фокальных механизмов DC-типа, которым отвечают необратимые тензоры с нулевым детерминантом. Это означает, что запрет распространяется на сдвиг в условиях $|\sigma_1| = |\sigma_3|$, при которых действуют только касательные (τ) напряжения.

Вместе с этим тензоры-девиаторы, характеризующие локальные НДС среды, имеют как положительные, так и отрицательные значения детерминантов. На схеме [11] они соответствуют области, допустимой для необратимых тензоров сейсмического момента, определяющих деформации в динамических режимах одноосного растяжения при $\text{Det}M_{ij} > 0$ и одноосного сжатия при $\text{Det}M_{ij} < 0$. Механизм деформаций в режиме одноосного растяжения характеризуют не только устойчиво положительные значения ($\text{Det}M_{ij} > 0$) тензоров, но и чётко структурированная картина центроидного распределения на сфере векторов деформаций, поэтому его можно отнести к сейсмическому механизму NDC-типа.

Веерное распределение векторов $C(\sigma_3)$ и $B(\sigma_2)$ (ис. 2, II, C и B) при $\sigma_3 = \sigma_2$ можно интерпретировать только как связанное с равномерным давлением флюидов на стенки проводящей тектонической зоны. Флюиды поступали в активный в режиме сдвига разлом под давлением более 4 кбар и температуре свыше 450°C (параметры соответствуют глубине 15–17 км [12]), добавляя, судя по вариациям оценок асимметрии тензоров, объёмные напряжения, действовавшие из центра масс флюидопотока на стенки разлома-проводника, что вызывало угасание сдвиговой компоненты. В таких условиях устойчивый механизм деформаций NDC-типа проявился как продукт триггерного воздействия флюидов на процесс разрушения, не зависящий от сдвига. Триггерный процесс разрушения под воздействием флюидов подтверждается большими вариациями параметров флюидной системы: давления (от 4,24 до 1,9 кбар), плотности водных флюидов (от 1,09 до 0,96 г/см³) и их газовой фазы (от 1,01 до 0,67 г/см³) [12]. Сброс давления на 2,3 кбар флюидного режима, снижение плотности углекислотно-водного флюида и его газовой фазы являются реакцией флюидной системы на дилатационную декомпрессию при заполнении флюидами вакуумированных трещинных зон.

Основное влияние сейсмических механизмов деформаций на миграцию флюидов состоит в том, что механизмы DC- и NDC-типов формируют в сфере накопления рудных концентраций различную, зависящую от параметров флюидного

режима структурно-гидродинамическую организацию рудообразующей системы и контролируют потоки флюидов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.48П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sibson R. H., Robert F., Poulsen K. H.* // *Geology*. 1988. V. 16. P. 551–555.
2. *Cox S. F.* // *Econ. Geol. Bull. SEG*. 2016. V. 111. № 3. P. 559–587.
3. *Dziewonski A. M., Woodhouse J. H.* // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 3247–3271.
4. *Лутиков А. И., Юнга С. Л., Кучай М. С.* // *Геофиз. исслед.* 2010. Т. 11. № 3. С. 11–25.
5. *Котов А. А., Прокофьев В. Ю., Злобина Т. М., Мурашов К. Ю.* В сб.: Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы. Материалы докладов III Всер. конф. Иркутск: ИЗК РАН, 2016. С. 156–159.
6. *Злобина Т. М., Петров В. А., Мурашов К. Ю., Котов А. А.* В сб.: Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I Тектонического совещания. М.: Геос, 2018. Т. 1. С. 218–223.
7. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
8. *Bingham Ch.* // *Ann. Stat.* 1974. V. 2. P. 1201–1225.
9. *Злобина Т. М.* Математические методы моделирования трещинных структур рудных месторождений. М.: Наука, 1991. С. 71–74.
10. *Bingham Ch., Mardia K. V.* // *Biometrika*. 1978. V. 65. P. 379–389.
11. *Юнга С. Л.* // *ДАН*. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.
12. *Злобина Т. М., Петров В. А., Прокофьев В. Ю., Котов А. А., Мурашов К. Ю.* Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы IV Всерос. конференции ИДГ РАН. М.: Геос, 2017. С. 274–284.
13. *Sylvester A. G.* // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1988. V. 100. № 31. P. 1666–1703.
14. *Злобина Т. М., Мурашов К. Ю., Котов А. А.* // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2014. № 3. Ч. 2. С. 55–61.

THE EFFECT OF SEISMIC DEFORMATION MECHANISMS ON FLUID MIGRATION IN ACCUMULATION AREA OF GOLD ORE CONCENTRATIONS

**T. M. Zlobina, Corresponding Member of the RAS V. A. Petrov,
K. Yu. Murashov, A. A. Kotov**

Received July 25, 2018

This study investigates the effect of mechanisms of paleodeformations during the period of fluid inflow into the accumulation sphere of gold concentrations. Such mechanisms are believed to correspond to DC- and NDC- type seismic mechanisms, whose main influence on fluid migration lies on the formation of different, relative to fluid regime parameters, structural and hydrodynamic organizations of the ore-forming system, and fluid flow control within the area of the accumulation of ore concentrations.

Keywords: mechanisms of paleodeformations, mechanisms corresponding to DC- and NDC-type seismic mechanisms, migration of fluids, structural and hydrodynamic organization of the system, parameters of fluid of the ore-gold deposits.