

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ АU-Q ЖИЛ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИРОКИНДА (МУЙСКИЙ ЗОЛОТОРУДНЫЙ РАЙОН)

Т.М. Злобина, К.Ю. Мурашов, А.А. Котов

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва,
Старомонетный пер., 35, Россия*

Структурно-динамическое и компьютерное 3D-моделирование позволило выявить новые закономерности механизмов формирования Au-Q жил и прогнозировать особенности структуры на глубине.

структурно-динамические условия, золото кварцевые жилы, 3D-моделирование, математическая статистика, тензоры, векторы

MODELING OF THE STRUCTURAL-DYNAMIC CONDITIONS OF GOLD- QUARTZ VEIN LOCALIZATION IN THE IROKINDA DEPOSIT (MUYSKIY GOLD REGION)

T.M. Zlobina, K.Yu. Murashov, A.A. Kotov

Structural-dynamic and computer-assisted 3D modeling provided a possibility to detect new trends of Au-Q vein formation mechanisms and predict specific structural features at depth.

structural-dynamic conditions, gold-quartz veins, 3D modeling, mathematical statistics, tensor, vectors

ВВЕДЕНИЕ

Ирокиндинское золоторудное поле представлено Au-Q жилами, локализованными на большой площади, в вертикальном диапазоне глубин более 1 км. Жилы размещены прерывисто в пологих тектонических зонах расщепления протяженностью от 3 до 7–10 км. Их падение от западно-северо-западного до юго-западного, под углами 25–45°. Зоны динамометаморфических сланцев (мощностью до 3 м) в архейских гранитогнейсах (рис. 1), маркируют размещение жил. Жилы ветвятся, объединяются, образуя сложную, часто нелинейную морфологию. Структура месторождения – мелкоблоковая, формировалась при полициклическом тектоническом развитии обрамляющих разломов в дорудный и интратрудный периоды. В интратрудный период субширотные разломы активизировались в режиме левых сдвигов, субмеридиональные – правых. Глубинными разломами контролируется интрузивный магматизм (PR_{1ms}). Жилы Ирокиндинского рудного поля относятся к мезотермальным образованиям (PR₃–PZ₁?) малосульфидной золото кварцевой формации, к Au-Pb-Zn минералого-геохимическому типу. Структурно-динамический механизм формирования рудовмещающих нарушений, способный объяснить закономерности локализации жил, не был изучен с детальностью, достаточной для прогнозных построений при эксплуатации. Цель исследований – формирование представления об особенностях структуры на глубоких горизонтах, ниже уровня разведанных запасов. Работа проведена по материалам компании «Бурятзолото».

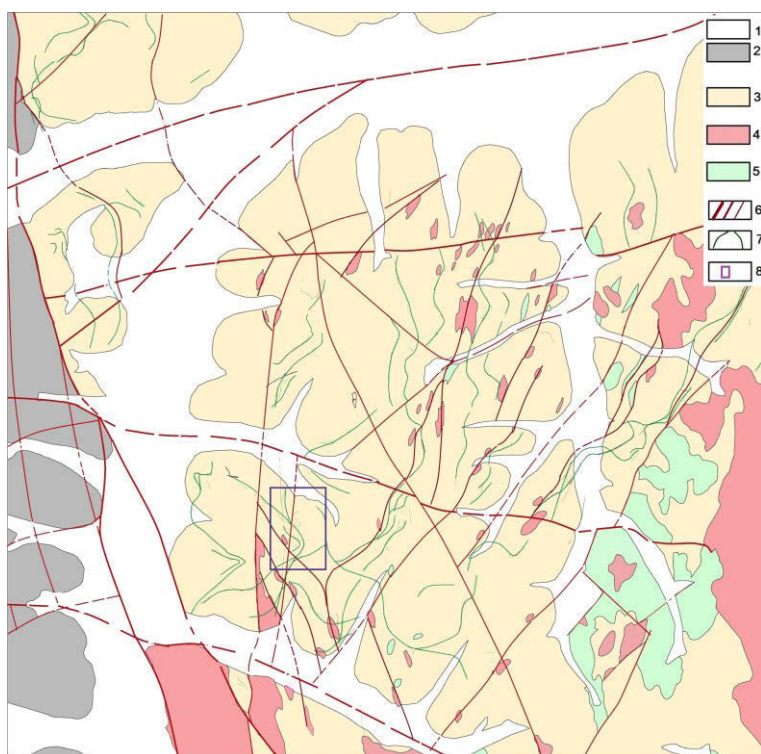


Рис. 1. Геолого-структурная карта Ирокиндинского рудного поля. М-б 1:25 000 (по материалам «Бурятзолото»).

1 – четвертичные отложения; 2 – породы аматканской свиты (PR₁₋₂); 3 – гнейсы киндиканской свиты архея; 4 – гранитоиды (PR_{1ms}); 5 – габброиды (PR_{1ms}); 6 – тектонические нарушения; 7 – зоны рассланцевания; 8 – участок 3D-моделирования Au-Q жил.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рудовмещающими являются структурные элементы низшего ранга, формирующиеся при *прогрессивном* развитии деформаций в процессе релаксации палеонапряжений на активных разломах. Моделирование механизма деформаций возможно по результатам палеострейн-анализа и оценкам вида напряженного состояния. Реконструкция главных нормальных векторов палеострейна по тангенциальным сколам, выполненным *минералами-индикаторами* гидротермального процесса (Au-Q и сульфидные прожилки), исключает процессы пред- и пострудного деформирования. Для оценки типа распределения векторов палеострейна использован математический аппарат оценки распределения на сфере ориентировок осевого типа Бингхема [3]. Вид напряженного состояния оценен по собственным значениям λ_1 , λ_2 , λ_3 собственных векторов матрицы тензора [3]. Палеострейн анализ проводился также геометрическим методом на сферограммах, построенных в изолиниях плотности распределения главных векторов палеострейна. Геометрическая картина в изолиниях определяет направление изменчивости процесса деформирования. Изменчивость изучалась также путем многовариантного анализа, как по обобщенным массивам данных, так и по небольшим выборкам из них, сгруппированным по близким значениям λ_1 , λ_2 , λ_3 . Материал собран при специальном структурном картировании отдельных площадок, расположенных в штольневых выработках (на горизонтах в диапазоне абсолютных отметок 926–1740 м), пройденных по простиранию шести наиболее крупных жил. Для построения 3D-модели морфологии *трех* сложно сопрягающихся жил использованы материалы рудничной эксплуатации.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка типа геометрического распределения векторов палеострейна на *обобщенных* сферограммах (рис. 2, II, III) показала однородное для всех участков, но нетрадиционное распределение – с растяжением в центре, концентрическими поясами сжатия и промежуточного, а также «смещенным» центром симметрии, общим для триады векторов. Данный центр (на рис. 2, II, III это Δ) – проекция косо ориентированной оси, имеющей одинаковый азимут $105\text{--}110^\circ$ и угол погружения 60° на всех обследованных участках, наиболее приближен к вектору деформаций А (растяжение), но не совпадает с максимумами его распределения на $10\text{--}20^\circ$. Такое распределение нетрадиционно. Обычно разгрузка напряжений на *прогрессивное* трещинообразование сопровождается вращением эллипсоида деформаций вокруг одного из его главных векторов: на сдвиге – вокруг В, ориентированной согласно сместителю разлома; на сдвиге-раздвиге – вокруг А, перпендикулярно сместителю. Тензоры таких деформаций всегда симметричны относительно векторов А, В, С.

Полученное распределение векторов палеострейна соответствует биполярному коническому распределению Бингхема с 4-й косо ориентированной осью вращения эллипсоида. Оно совпадает с геометрическим, полученным на *изометрических проекциях* сетки Шмидта: проекции сечений конусов Бингхема также эллиптические (см. рис. 2, II, III). Динамическая обстановка характеризует достаточно устойчивый режим. При пологом всесторонне меняющемся сжатии и косо ориентированном растяжении режим с параметрическими оценками $\lambda_3(A) = 0,4$; $\lambda_1(C) \approx \lambda_2(B) = 0,6\text{--}0,5$ ($\sigma_3 < \sigma_2 \approx \sigma_1$, где $\sigma_1 \approx C$), можно интерпретировать как режим сдвига-надвигового типа с вращением в полой плоскости ВС, перпендикулярной оси симметрии Δ . Но в этих же выборках получены и другие оценки: $\lambda_3(A) = 0,6\text{--}0,7$; $\lambda_1(C) \approx \lambda_2(B) = 0,4\text{--}0,5$, ($\sigma_3 > \sigma_2 \approx \sigma_1$), что соответствует раздвигу с вращением. Изучение распределения векторов палеострейна малых выборок, сгруппированных по близким значениям λ_1 , λ_2 , λ_3 , показало неустойчивые динамические режимы с инверсией главных напряжений и изменением вида напряженного состояния (см. рис. 2, I, II', III').

Там, где размещение жил приближено к области пересечения двух разломов, активных в синрудный период в режимах левого и правого сдвигов, получена наиболее изменчивая картина (см. рис. 2-I). Отмечались режимы как *одноосного сжатия*, так и *одноосного растяжения*. В режиме *одноосного сжатия* отмечены варьирование λ_1 , λ_2 , λ_3 и перераспределение сжатия – растяжения путем их выравнивания до σ_2 при пологом σ_1 и субвертикальном σ_2 . Режимы на трещинном каркасе испытывали влияние режимов на ближайших разломах: сдвига в условиях транспрессии ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) и сдвига в условиях транстенции ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$). Режим *одноосного растяжения* получен при геометрической инверсии всех трех векторов палеострейна ($A \leftrightarrow B$, С развернулось в полой плоскости) при высоких значениях λ_3 и небольших $\lambda_1 \approx \lambda_2$, ($\sigma_1 = \sigma_2 \ll \sigma_3$). Неустойчивые режимы то сжатия, то растяжения получены и на центральном участке (см. рис. 2, II'). Сферограмма (см. рис. 2, III') иллюстрирует сложную инверсию пар векторов палеострейна в плоскостях тектонических нарушений.

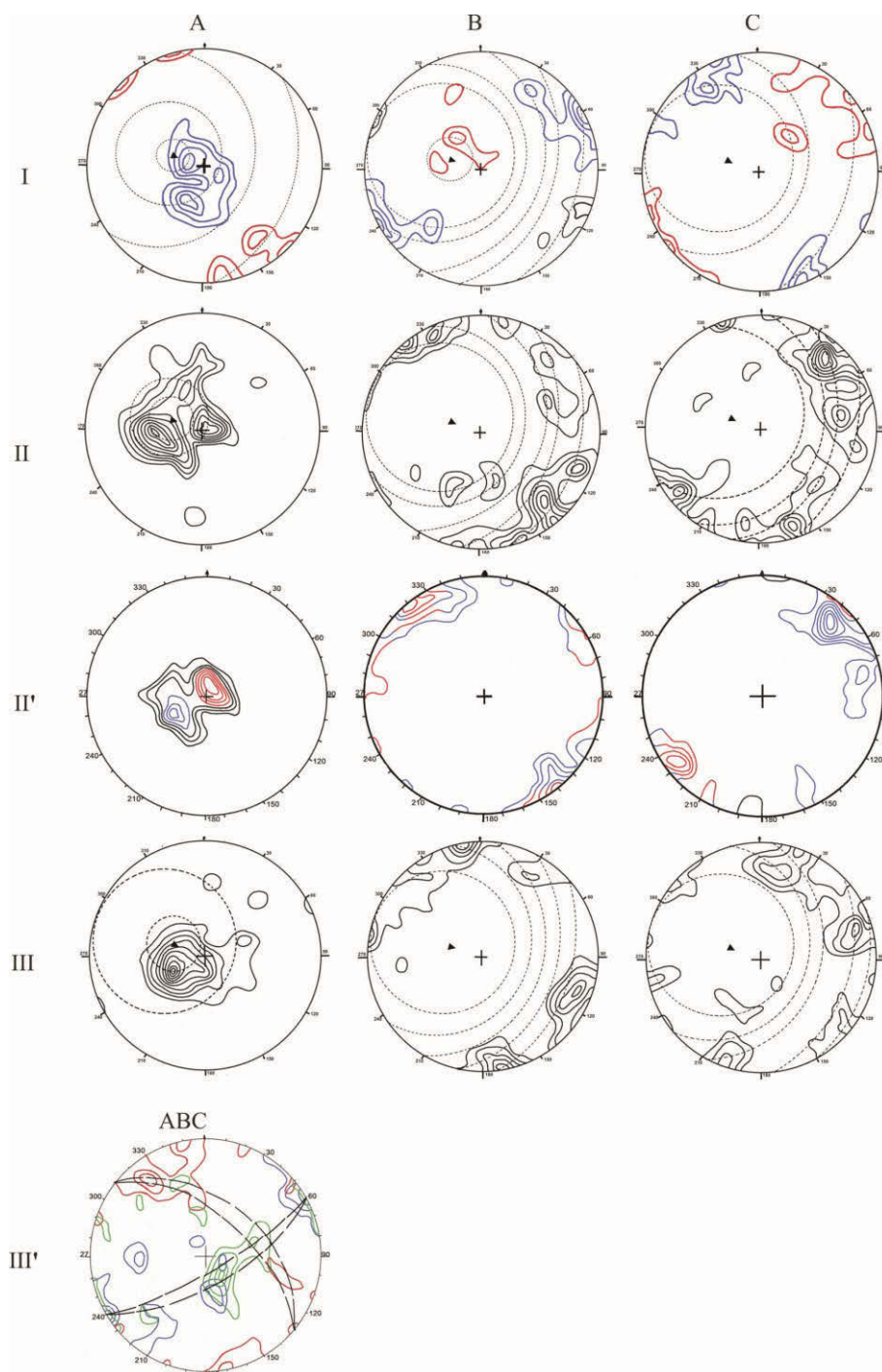


Рис. 2. Сферограммы распределения векторов палеострейна неустойчивых (с центром симметрии +) и устойчивых (с центром симметрии Δ) – локальных динамических обстановок. Изолинии плотностей распределения: А – растяжения (σ_3), В – промежуточного (σ_2), С – сжатия (σ_1) в % (0,5–1,0–1,5–2,0–2,5–3,0–3,5) на верхней полусфере сетки Шмидта.

I – общая выборка – 80 замеров: *красные изолинии* (32 замера) – неустойчивый динамический режим одноосного сжатия, с центром симметрии (+), *синие изолинии* – одноосное субвертикальное растяжение, с центром симметрии (+); общее распределение (синих и красных) – устойчивое, с центром симметрии Δ. II – общая

выборка (80 замеров) – устойчивый динамический режим с центром симметрии (Δ); II' – выборка (38 замеров) из массива II – неустойчивый режим с центром симметрии (+), *красные изолинии* – преобладает растяжение ($\sigma_1 \approx \sigma_2 \ll \sigma_3$), *синие* – сжатие ($\sigma_1 \gg \sigma_2 \approx \sigma_3$). III – общая выборка (70 замеров) – устойчивый режим с центроидным распределением А, В, С и центром симметрии (Δ); III' – выборка (28 замеров) из массива данных III – неустойчивый режим, с центром симметрии (+), локальной инверсией векторов: А – синие, В – красные, С – зеленые.

Переменные режимы одноосных сжатия или растяжения в тензорах частных механизмов деформирования симметричны относительно А, В, С, а геометрическое распределение векторов А, В, С – относительно центра обычной сетки Шмидта (на рис. 2 это +), тогда как устойчивое центроидное – симметрично относительно 4-й оси симметрии (Δ). Механизмы с распределением напряжений в виде центров сжатия и/или растяжения

получены сейсмологами *в коре* по знакам первых вступлений P-, SH- и SV сейсмических волн от землетрясений [1].

ДЕФОРМИРОВАНИЕ В ПАЛЕОСЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В публикациях сейсмологов о неустойчивом развитии сейсродинамических систем рассматривается значение триггерного воздействия водных флюидов на процесс разрушения [2]. Внедрение флюидов в сейсмоактивный проводящий разлом сопровождается инъективно-гидродинамическим деформированием боковых пород: локально добавляет инъективно-гидродинамический стресс (одноосное *субвертикальное сжатие* при малых пологих $\sigma_3 = \sigma_2$). Гидродинамическая система вступает в конфронтационное взаимодействие с тектонодинамической на разломе, где *пологое боковое сжатие* выравнивается до σ_2 , действующего *еще субвертикально*. Условия транспрессии *локально* меняются на условия транстенции. По мере увеличения объема флюидов возрастает поровое давление боковых пород, боковое сжатие увеличивается, что приводит к усилению процесса прогрессивного трещинного разрушения боковых пород. Триггерный эффект изменяет условия одноосного сжатия на *условия преобладающего растяжения* при резком спаде давления. По устному сообщению В. Ю. Прокофьева, судя по термобарометрическим исследованиям включений в кварце из жил Ирокинды, процесс гетерогенизации флюидов характеризуется перепадами давлений более чем на 2 кбар (от 3530 до 1350 бар) и температур более чем на 100 °С (от 386 до 277 °С).

Динамически неустойчивая система, все более удаляясь от состояния равновесия, переходит в режим пульсационной нагруженности пород, при которой более активны то сжимающие, то растягивающие напряжения, а гидродинамическая – в колебательный режим. Энергетический потенциал системы периодически возобновляется за счет триггерного усиления сейсмического процесса. *Переходы от локальной динамической неустойчивости к равновесию* возникают *при условии диссипации энергии* [2]. Динамический процесс развивался путем самоорганизации (скейлинга) на низшем иерархическом уровне. Показатели самоорганизации – понижение энтропии (диссипация сейсмической энергии, резкое снижение РТ-параметров флюидов), потеря симметрии сейсродинамической системы. Скейлинг завершился *фазовым переходом* (бифуркацией) системы в качественно новое состояние в критических точках. Механизм бифуркаций Хопфа [4] устанавливает связь между потерей устойчивости положений равновесия и возникновением автоколебаний в системе. Это локальная бифуркация векторного поля, при развитии которой особая точка-фокус теряет устойчивость и от него отделяется предельный замкнутый цикл. Бифуркация Хопфа – фазовый переход, породивший новый предельный цикл развития Ирокиндинской сейсродинамической системы с 4-й осью симметрии ($\Delta = N$ – ось вращения эллипсоида) и замкнутым центроидным распределением векторов палеострейна.

СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ И 3D-МОДЕЛИ

Напряжения сжатия переходят в бифуркационном режиме в напряжения *крутящегося сжатия* с выравниванием $\sigma_1 = \sigma_2$, что обуславливает меняющуюся по всему

лимбу компаса азимутальную ориентировку пологих векторов ($C = B$) палеострейна. Этот динамический режим необычен *нелинейной объемной релаксацией напряжений*. Вследствие необратимости процессов самоорганизации образованные на всех ее этапах структурные формы сохранились. При пульсирующих напряжениях сжатия и растяжения образовались линейные формы – эшелонированные сдвиги и раздвиги по пологим сколам, ориентированным согласно простиранию ближайших мелких разломов. Нелинейная релаксация напряжений бифуркационного поля расходовалась на трещинные деформации вращательного сдвига в плоскости перпендикулярно H , вызвавшего образование «крутящихся» тангенциальных сколов. Завершающему на момент заполнения флюидами трещинного пространства «фазовому портрету» структурно-динамического деформирования (см. рис. 2, II, III) соответствует модель (рис. 3, а) с погружением оси $H = 60^\circ$.

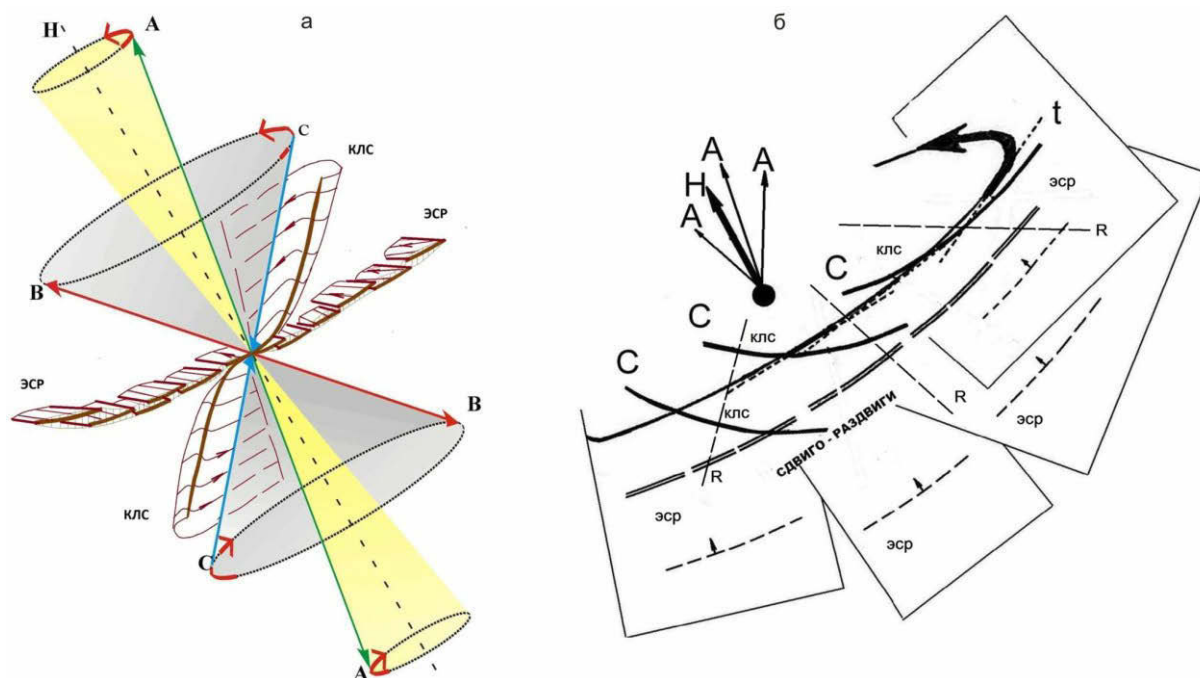


Рис. 3. Модель сейсмодетформирования среды в условиях триггерного эффекта флюидов (а) и план-схема структурных парагенезов (б).

H – ось симметрии динамической системы и вращения эллипсоида в направлении, указанном стрелкой; ЭСР – эшелонированные сдвиги-раздвиги; КЛС – коническая листринговая структура; сколы: t – тангенциальные, R – радиальные.

В условиях вращательного сдвига формируется серия эшелонированных сдвиги-раздвигов с различающимся простиранием и близким пологим (в среднем 30°) падением (см. рис. 3, б). При внедрении флюидов они объединяются, образуя пологие главные структурные зоны нелинейной морфологии. Тангенциальные сколы при действии крутящегося сжатия объединились в конические, примыкающие к главным пологим структурным зонам сверху и снизу (см. рис. 3, а), где они должны иметь противоположное падение. При их объединении флюидами, создается листринговая (пропеллер) структура, а жилы в ней имеют сигмоидную морфологию (рис. 4).

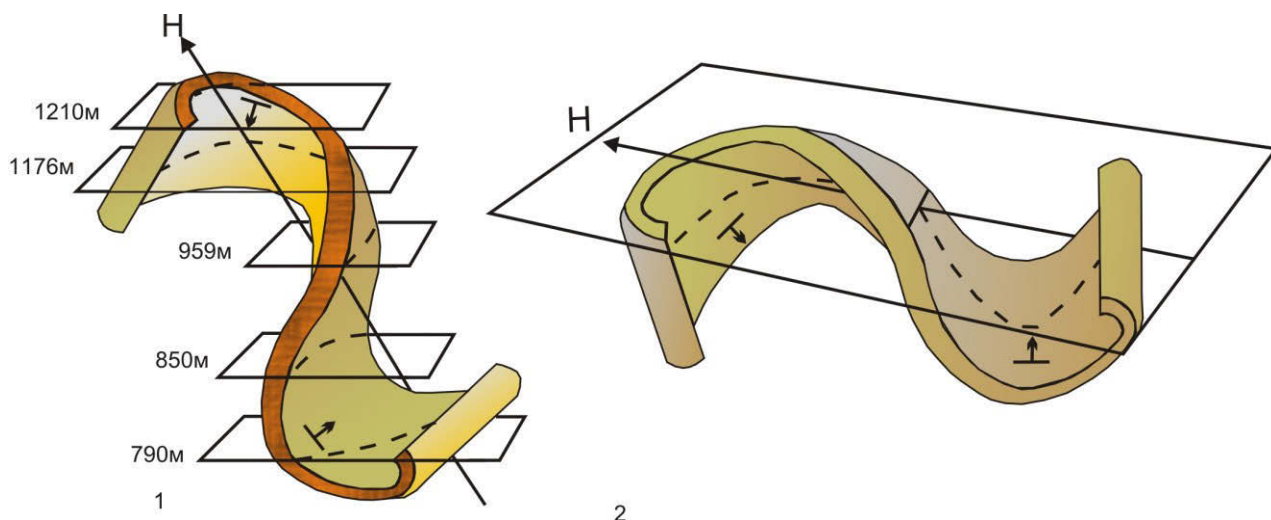


Рис. 4. Сигмоидные жилы в листринговых структурах при круто (1) и полого (2) ориентированной Н.

На штольневых горизонтах сигмоидная форма: а – не очевидна, проекции на горизонтальные плоскости конические; б – очевидна, проекция сигмоидная.

Штольневыми горизонтами вскрыты верхние хвосты таких жил до абсолютных отметок 929 м. На проектируемых ниже этого уровня горизонтах предполагается размещение нижних хвостов. Компьютерное 3D-моделирование морфологии наиболее сложно сопрягающихся *трех* жил проведено по материалам регулярных замеров азимутальных ориентировок жил, зафиксированных при эксплуатационном опробовании на всех штольневых горизонтах (2026 замеров). Графическая визуализация результатов приведена на рис. 5. Совместный анализ структурно-динамической (см. рис. 3) и 3D-модели показал, что жила 35 локализована в структуре конического скола. Жила Лагерная и 30 локализованы в сдвиго-раздвиге, входящем в серию эшелонов одной из главных структурных зон. Анализируя 3D-модель в различных проекциях (XYZ), мы пришли к выводу о существовании признаков листринговой структуры: в месте сочленения жил Лагерная и № 30 угол сопряжения 15–30°, отмечены два поперечных тектонических нарушения, а в юго-западном «окончании» жилы № 30 на горизонте 929 м – признаки листрингового пережима. На горизонтах ниже 900 м следует ожидать наличие нижнего хвоста жилы № 35 с обратным падением.

ВЫВОДЫ

Линейные и нелинейные структурные парагенезы месторождения Ирокинда сформированы в процессе самоорганизации палеосейсmodинамической системы.

Работа выполнена при поддержке компании Nordgold-Бурятзолото и гранта РФФИ №13-05-00084.

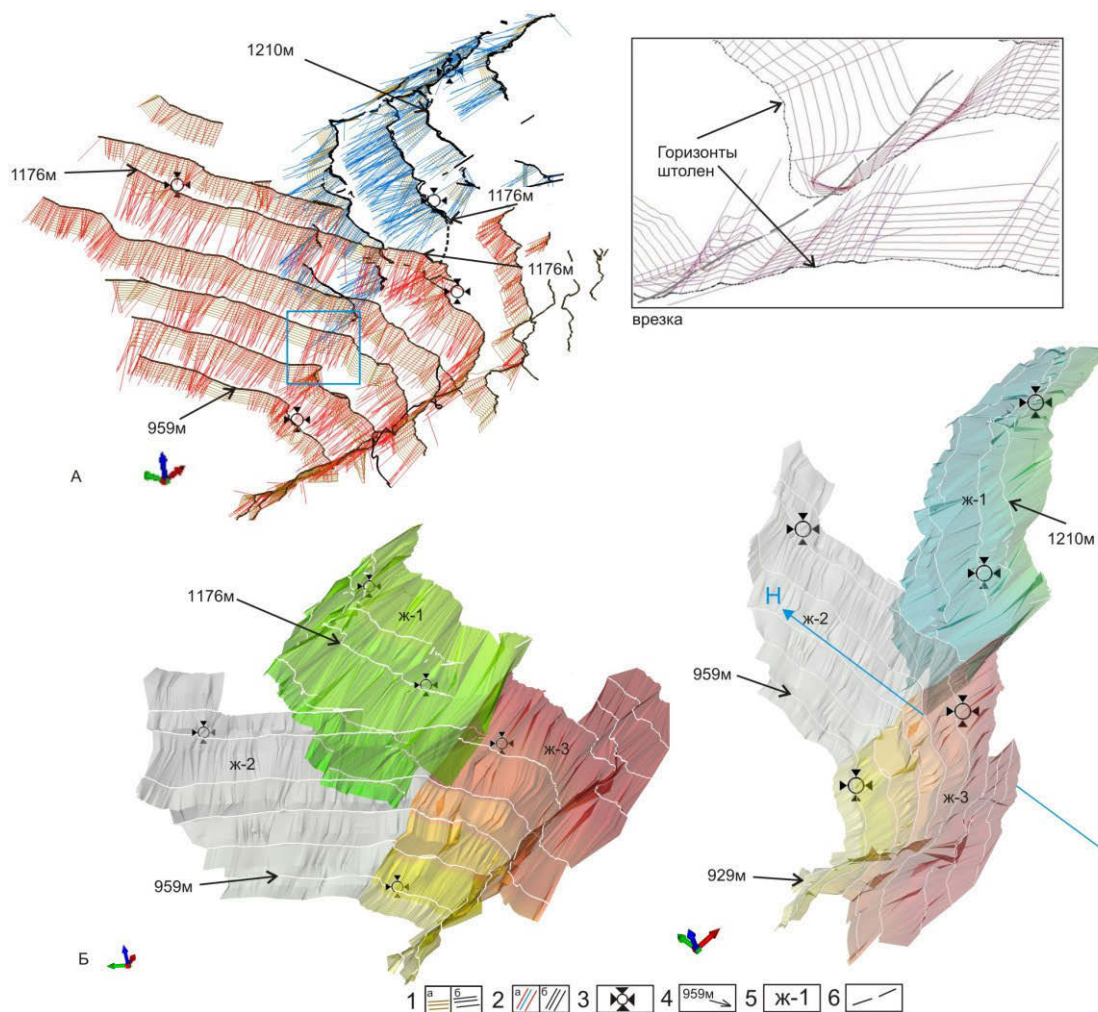


Рис. 5. Графическая визуализация результатов 3D-моделирования, выполненного в м-бе 1:1000, с использованием методов: ручной интерполяции (а) и триангуляции (б).

а – проекция каркаса, на врезке – увеличенный фрагмент, вид сверху под углом; б – модель морфологии жил с двумя видами визуализации при разных разворотах в 3D, согласно X, Y, Z.

1 – отрезки векторов падения жил на горизонтах штолен: а – на каркасе, б – на врезке; 2 – полигональные линии: а – на каркасе, б – на врезке; 3 – площадки структурных исследований; 4 – абсолютные отметки горизонтов штолен; 5 – жилы (ж-1 – Лагерная, ж-2 – № 35, ж-3 – № 30); 6 – тектоническое нарушение на врезке; Н – ось симметрии модели деформирования на 3D-модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лутиков, А.И., Юнга С.Л., Кучай М.С. Сейсмические источники, не удовлетворяющие модели двойного диполя: критерий выявления и распределение в островных дугах // Геофизические исследования, 2010. Т. 11, № 3. С. 11–25.

2. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений / Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 15–43.

3. Bingham С.К., Mardia V. A small circle distribution on the sphere // Biometrika, 1978. V. 65. P. 379–389.

4. Hopf E. Abzweigung einer periodischen Lösung von einer stationären Lösung eines Differential systems // Ber. Math-phys. Kl. Sachs. Acad. Wiss. Leipzig, 1942. V. 94. P. 3–22.