



## Раздел 5

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
УСЛОВИЙ РУДООБРАЗОВАНИЯ

№ 3 с. Ч. 2 ♦ 2014

УДК 551.243:553.065.2(411)

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

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

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

**Ключевые слова:** структурно-динамические условия, золотокварцевые 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.

**Keywords:** structural-dynamic conditions, gold-quartz veins, 3D modeling, mathematical statistics, tensor, vectors.

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 гранитоидных массивах (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<sub>1</sub>ms). Жилы Ирокиндинского рудного поля относятся к мезотермальным образованиям (PR<sub>3</sub>–PZ<sub>1</sub>?) малосульфидной золотокварцевой форма-

ции, 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».

**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 деформиро-

ИГЕМ РАН (Москва)

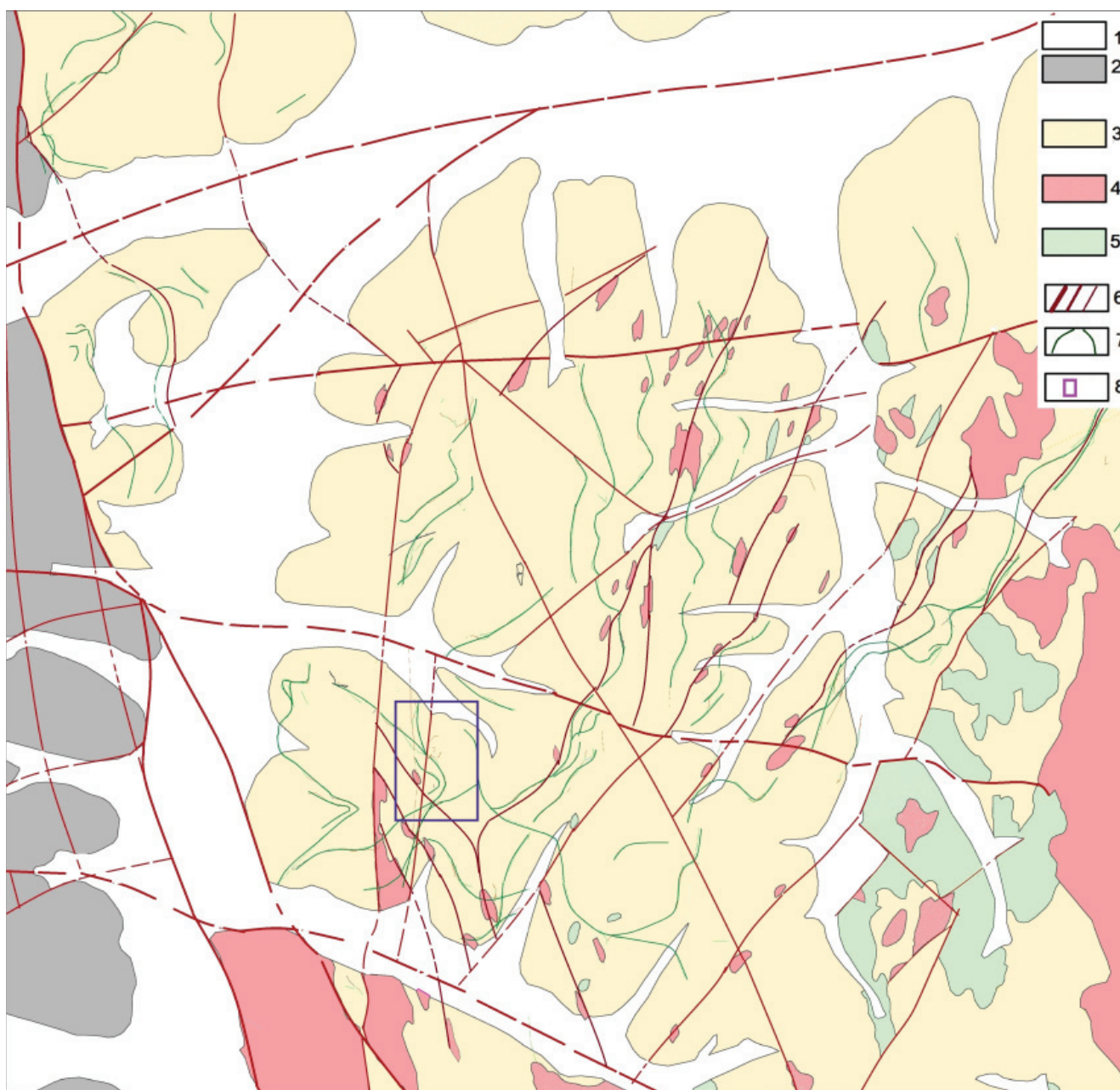


Рис. 1. Геолого-структурная карта Ирокиндинского рудного поля. М-б 1:25 000 (по материалам «Бурятзолото»)

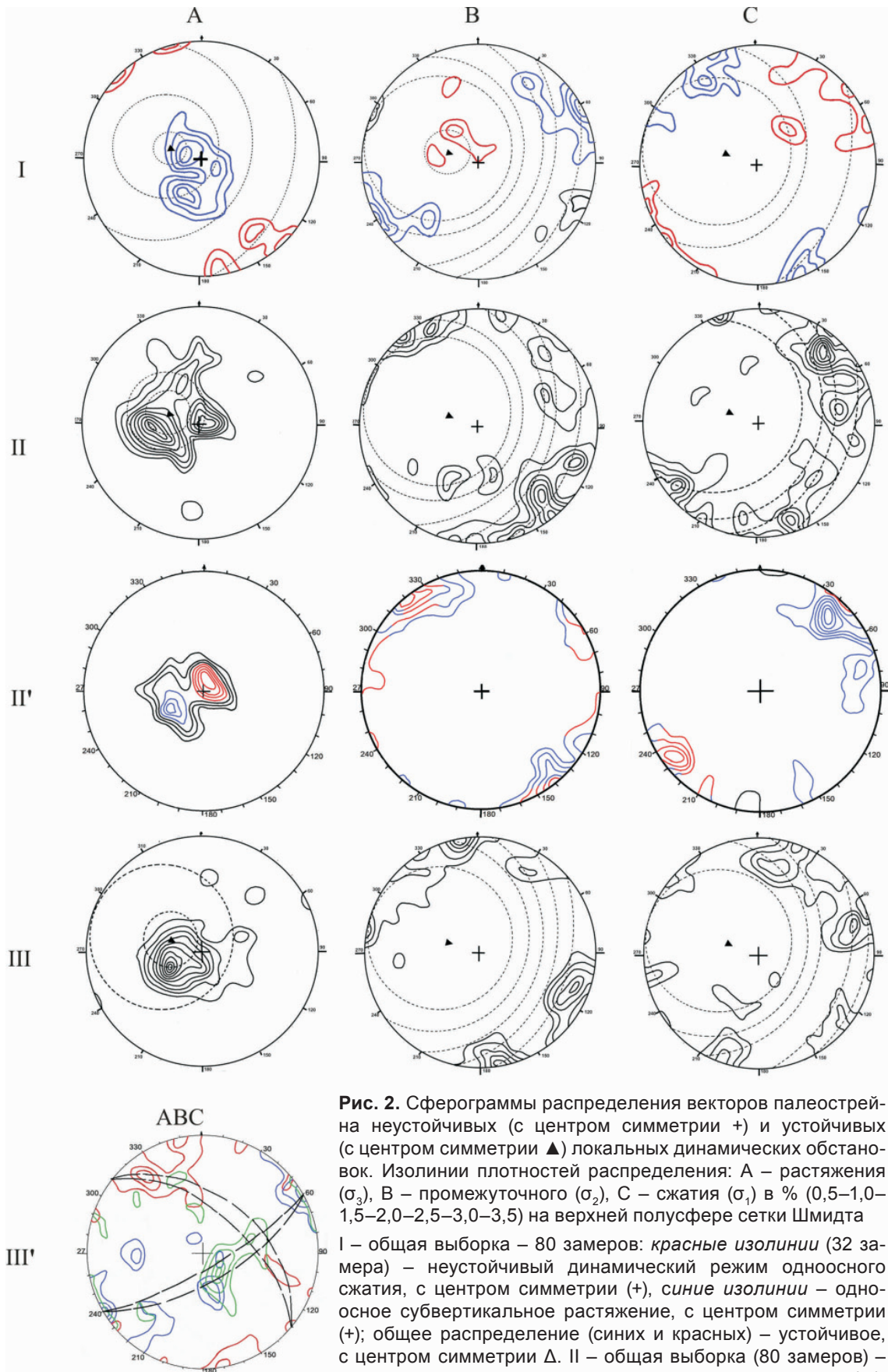
1 – четвертичные отложения; 2 – породы аматканской свиты ( $PR_{1-2}$ ); 3 – гнейсы киндиканской свиты архея; 4 – гранитоиды ( $PR_{ms}$ ); 5 – габброиды ( $PR_{ms}$ ); 6 – тектонические нарушения; 7 – зоны рассланцевания; 8 – участок 3D-моделирования Au-Q жил

вания. 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  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  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. Кроме того, изменчивость изучалась путем многовариантного анализа как по обобщенным массивам данных, так и по небольшим выборкам из них, сгруппирован-

ным по близким значениям  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ . 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 однород-



**Рис. 2.** Сферограммы распределения векторов палеострессов на неустойчивых (с центром симметрии +) и устойчивых (с центром симметрии ▲) локальных динамических обстановках. Изолинии плотностей распределения: А – растяжения ( $\sigma_3$ ), В – промежуточного ( $\sigma_2$ ), С – сжатия ( $\sigma_1$ ) 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 (▲); 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 центридным 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



ное 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  $\blacktriangle$ ) – проекция косо ориентированной оси, имеющей одинаковый азимут 105–110° и угол погружения 60° на всех обследованных участках, наиболее приближен к вектору деформаций  $A$  (растяжение), но не совпадает с максимумами его распределения на 10–20°. Такое распределение нетрадиционно. Обычно разгрузка напряжений на *прогрессивное* трещинообразование сопровождается вращением эллипсоида деформаций вокруг одного из его главных векторов: на сдвиге – вокруг  $B$ , ориентированной согласно сместителю разлома; на сдвиге-раздвиге – вокруг  $A$ , перпендикулярно сместителю. Тензоры таких деформаций всегда симметричны относительно векторов  $A, B, C$ .

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  $\lambda_3(A) = 0,4$ ;  $\lambda_1(C) \approx \lambda_2(B) = 0,6–0,5$  ( $\sigma_3 < \sigma_2 \approx \sigma_1$ , где  $\sigma_1 \approx C$ ), можно интерпретировать как режим сдвиге-надвигового типа с вращением в пологой плоскости  $BC$ , перпендикулярной оси симметрии  $\blacktriangle$ . Но в этих же выборках получены и другие оценки:  $\lambda_3(A) = 0,6–0,7$ ;  $\lambda_1(C) \approx \lambda_2(B) = 0,4–0,5$ , ( $\sigma_3 > \sigma_2 \approx \sigma_1$ ), что соответствует раздвигу с вращением. Изучение распределения векторов палеострейна малых выборок, сгруппированных по близким значениям  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , показало неустойчивые динамические режимы с инверсией главных напряжений и изменением вида напряженного состояния (см. рис. 2, I, II', III').

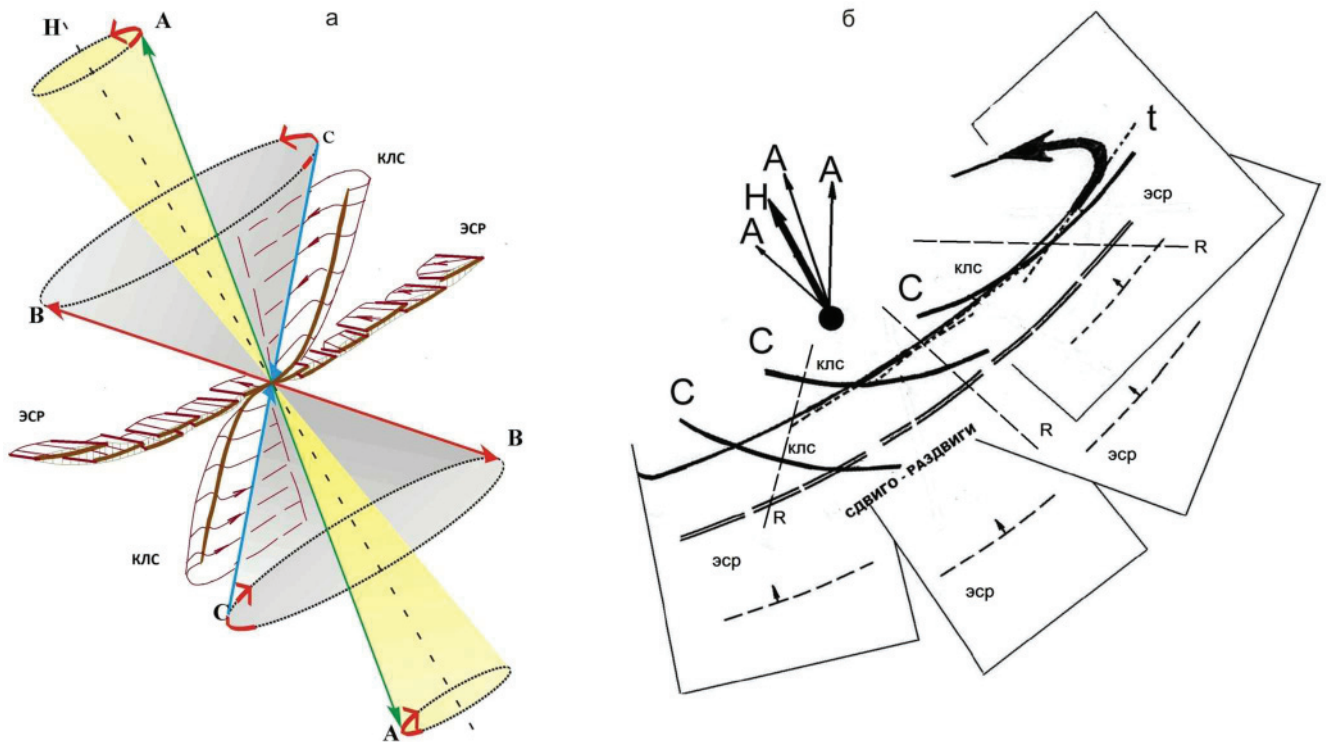
Там, где размещение жил приближено к области пересечения двух разломов, активных в синрудный период в режимах левого и правого сдвигов, получена наиболее изменчивая картина (см. рис. 2, I). Отмечались режимы как *одноосного сжатия*, так и *одноосного растяжения*. В режиме *одноосного сжатия* отмечены варьирование  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и перераспределение сжатия – растяжения путем их выравнивания до  $\sigma_2$  при пологом  $\sigma_1$  и субвертикальном  $\sigma_2$ . 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 ( $A \leftrightarrow B, C$  развернулось в пологой плоско-

сти) при высоких значениях  $\lambda_3$  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. Переменные режимы одноосных сжатия или растяжения в тензорах частных механизмов деформирования симметричны относительно  $A, B, C$ , а геометрическое распределение векторов  $A, B, C$  – относительно центра обычной сетки Шмидта (на рис. 2 это  $+$ ), тогда как устойчивое центроидное – симметрично относительно 4-й оси симметрии ( $\blacktriangle$ ). 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  $\sigma_2$ , 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



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

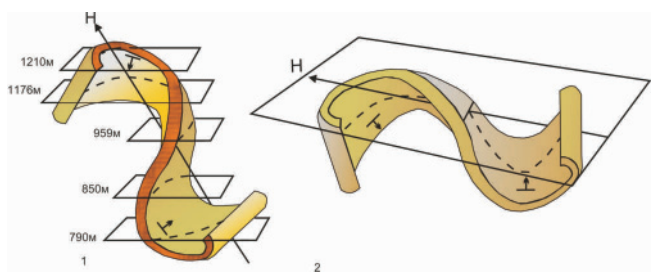
H – ось симметрии динамической системы и вращения эллипсоида в направлении, указанном стрелкой; ЭСР – эшелонированные сдвиго-раздвиги; КЛС – коническая листринговая структура; сколы: t – тангенциальные, R – радиальные

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 сейсmodинамической 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 сейсmodинамической системы с 4-й осью симметрии ( $\Delta = H$  – ось вращения эллипсоида) и замкнутым центроидным распределением векторов палеострейна.

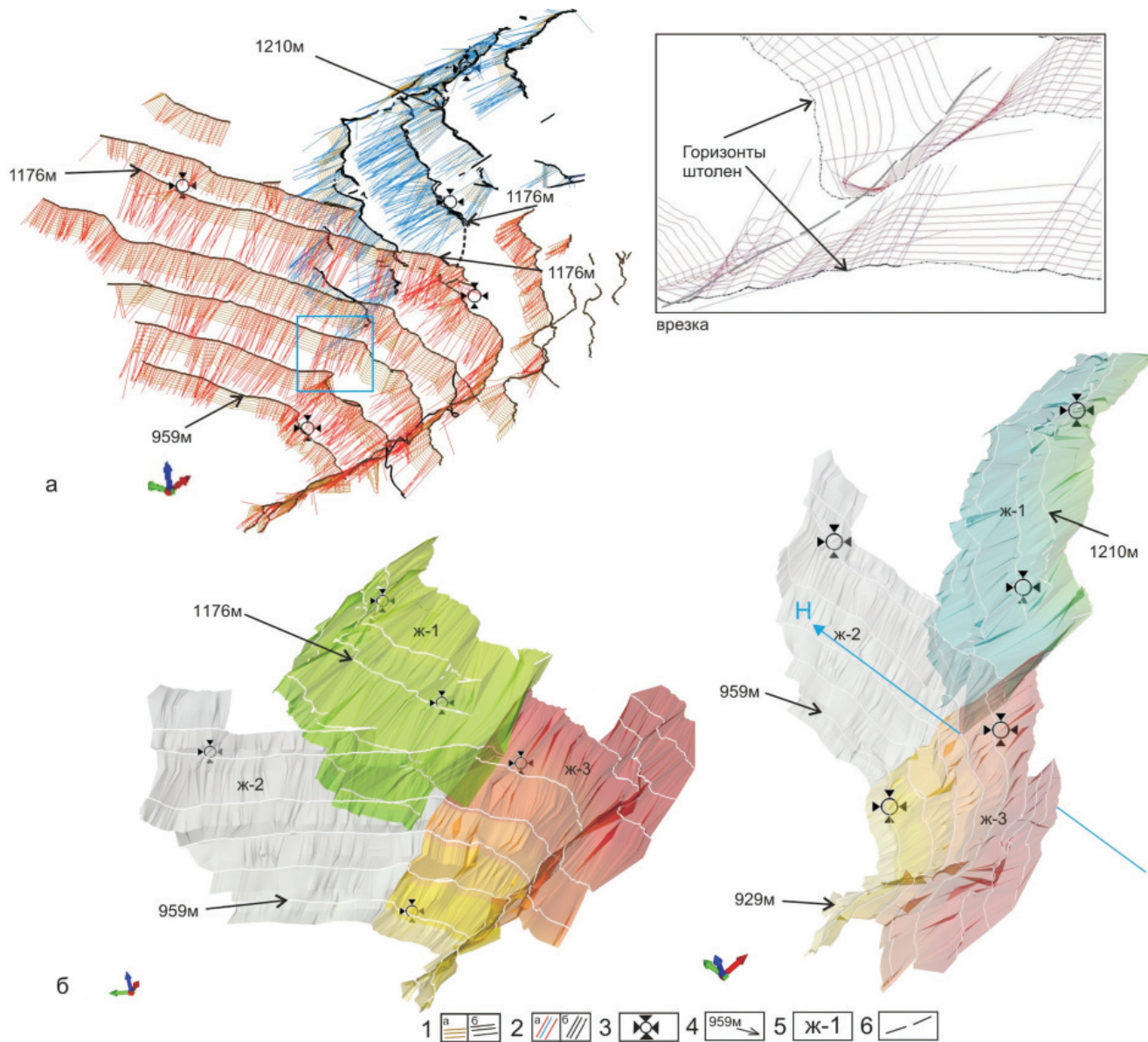
### Структурно-динамическая и 3D-модели

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 напря-*

*жений.* 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  $H = 60^\circ$ . В условиях вращательного сдвига формируется серия эшелонированных сдвиго-раздвигов с различающимся простиранием и близким пологим (в среднем  $30^\circ$ ) 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



**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

Штольневые горизонты 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 про-

ведено 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-динамиче-



ской (см. рис. 3) и 3D-модели показал, что жила 35 локализована в структуре конического скола. Жилы 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  $15\text{--}30^\circ$ , 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 палеосейсмодинамической системы.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Соболев, Г. А.** Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии [Текст] / Г. А. Соболев // 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, C.** A small circle distribution on the sphere [Text] / C. Bingham, K. V. Mardia // Biometrika. – 1978. – Vol. 65. – P. 379–389.

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

© Т. М. Злобина, К. Ю. Мурашов, А. А. Котов, 2014