

---

---

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ  
И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

---

---

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ  
ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ  
ТАРЫНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)**

© 2020 г. Д. В. Сивков<sup>a, b, \*</sup>, А. Ф. Читалин<sup>a, b</sup>, А. Л. Дергачев<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>b</sup>ООО “Институт геотехнологий”, Москва, Россия

\*e-mail: sivkovdmitrij@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.05.2019 г.

С развитием геоинформационных систем и увеличением сфер применения их в геологии появилась уникальная возможность оптимизации процесса идентификации линеаментов на изображениях поверхности Земли с использованием ресурсов портативных компьютеров. Выделение первичных линейных объектов сводится к их поиску на изображениях в виде линейных и относительно протяженных границ между контрастными участками и/или последовательностями пикселей одного тона. Подобный анализ был проведен в пределах крупного золоторудного поля на территории Восточной Якутии с целью выделения региональных и локальных линеаментов. Для интерпретации полученных результатов использовались общепринятые модели, предложенные для объяснения ориентировки разломов в однородной среде. В пределах всего Тарынского рудного поля обнаруживаются линеаменты, вероятно, соответствующие тектоническим нарушениям 3-х стадий сжатия. Предполагаемое взаиморасположение осей главных нормальных напряжений на разных стадиях деформаций подтверждается результатами линеаментного анализа, интерпретации трещиноватости в обнажении в долине реки Большой Тарын, а также данными разведочного бурения

*Ключевые слова:* линеаменты, геоинформационные системы, дистанционное зондирование, месторождения золота, поисковые признаки

**DOI:** 10.31857/S020596142001011X

## ВВЕДЕНИЕ

Термин “линеамент” был введен американским геологом У. Хоббсом (Hobbs, 1904): “Наиболее значительные линеаменты лика Земли могут быть описаны как гребни хребтов или границы поднятых областей, линии тальвегов, линии побережий и линии границ геологических формаций, петрографических типов пород или контуров обнажений”. Линеаментный анализ представляет собой эффективный комплекс геоморфологических, геологических, дистанционных и других методов картирования геолого-геоморфологических объектов линейного характера. Выявленные в результате исследований линейные структуры могут использоваться для решения ряда прикладных задач, таких, например, как определение путей миграции подземных вод, поиск месторождений полезных ископаемых, оценка стабильности блоков геологической (Бондур, Зверев, 2005а, 2005б, 2007).

К формированию относительно прямых морфологических линий в рельефе зачастую могут

приводить тектонические нарушения в массиве пород и другие геологические объекты, например дайки. Следовательно, выявленные на спутниковых снимках, аэрофотоснимках и цифровых моделях рельефа линейные объекты, представленные в том числе прямолинейными очертаниями долин, склонов или хребтов могут представлять собой естественные геологические объекты. Выделение линеаментов, как правило, производится исключительно визуально — по относительно прямолинейным сегментам гидрографической и овражно-балочной сетей, береговых линий природных водоемов, а также форм микрорельефа. Анализ обширных территорий (десятки км<sup>2</sup>) при помощи такого метода требует большого количества времени и предельной зрительной концентрации.

С развитием геоинформационных систем и увеличением сфер применения их в геологии появилась возможность оптимизировать процесс идентификации линеаментов, используя ресурсы портативных компьютеров. Точность иденти-

фикации линеаментов при этом, для обеих методик напрямую зависит от разрешения изображения: высокое разрешение изображения позволяет выделять линеаменты небольшой протяженности, плохо выраженные в рельефе.

## ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

В административном отношении Тарынское золоторудное поле (ТЗРП), имеющее размеры  $16 \times 17$  км, располагается на востоке Республики Саха (Якутия) в Оймяконском районе, в 70 км южнее пгт. Усть-Нера — административного центра района. В структурно-тектоническом отношении рассматриваемая территория принадлежит Верхне-Индигирскому мегасинклинию Яно-Индигирской синклинали зоны, выделяемой в структуре Верхояно-Колымской складчатой системы и ассоциирует с поздне триасовыми флишевыми образованиями (рис. 1).

В конце 1970-х гг. рядом исследователей (Владимиров, 1977; Бергер, 1978; Индолев и др., 1980) была выявлена связь Адыча-Тарынской золото-сурьмяной металлогенической зоны со скрытым субвертикальным глубинным разломом северо-западного простирания, по периферии которого отмечаются участки повышенной дислоцированности и трещиноватости вмещающих пород. Была отмечена приуроченность наиболее крупных и богатых золото-кварцевых жил к узлам пересечения магистрального разлома с поперечными разрывными нарушениями.

ТЗРП расположена в пределах сочленения Тарынской мегасинклинали и Нельканского брахиантиклинория и контролируется Большетарынской ветвью регионального Адыча-Тарынского глубинного разлома (АТЗ), протягивающегося более чем на 1000 км (Мокшанцев и др., 1975). Роль рудоконтролирующих структур здесь играют тектонические нарушения северо-западного простирания, секущие северную часть субмеридиональной Пильской антиклинали. Немаловажное значение в пределах площади имеют поперечные к складчатости зоны разрывов северо-восточного и субширотного простирания. Это, как правило, крутопадающие сбросы с амплитудой перемещения до первых десятков метров.

Согласно ряду исследований Адыча-Тарынский глубинный разлом представляет собой крупную левосдвиговую дизъюнктивную зону (Парфенов, 1988). Роль сдвигов Яно-Колымского региона и Восточной Якутии в контроле золоторудной минерализации, подробно описаны в современных работах (Прокопьев и др., 2000; Шахтыров, 2009; Аристов и др., 2015; Войтенко, 2015; Читалин, 2016; Читалин и др., 2018). Авторами также изложены предположения о реверсивном харак-

тере кинематики АТЗ, т.е. возникновении правосторонних движений после левосдвиговых.

Локализация оруденения определяется, главным образом, деформационным фактором, обуславливающим повышенную проницаемость среды для рудоносных растворов. При наличии нескольких фаз деформации степень структурной неоднородности среды возрастает, что ведет к возникновению участков компрессии и декомпрессии. Большинство золоторудных месторождений и проявлений золота ТЗРП локализовано, главным образом, в поперечных по отношению к АТЗ структурах — на участках тектонических нарушений и в областях повышенной трещиноватости пород. Как показывают результаты анализа разномасштабных геологических карт в пределах ТЗРП поперечные разломы, в большей степени, обладают не сбросовой, а сдвиговой кинематикой (Читалин и др., 2018).

Все известные в регионе жильно-прожилковые рудопроявления приурочены к локальным зонам смятия или разрывам ЗСЗ простирания, секущим почти под прямым углом крылья и замковую часть региональной Пильской антиклинали. Рудные тела представлены пологими мощными штокверками с вкрапленно-прожилковой кварц-сульфидной минерализацией с высоким содержанием золота. Роль рудоподводящих, реже рудовмещающих структур играют наиболее проницаемые участки крутопадающих тектонических нарушений. Для месторождения Дрожное были предложены различные структурные модели формирования золотоносных штокверков: модель комбинации соскладчатых рудоконтролирующих структур межслоевого отслоения, надвига и сдвига (Аристов и др., 2015; Войтенко, 2015), модель послескладчатого рудоконтролирующего левого сдвига (Читалин и др., 2018).

На одном из крупных месторождений ТЗРП прожилково-вкрапленная золото-кварцевая минерализация обнаруживается только в штокверках линейной морфологии и приурочена, главным образом, к ядру Пильской антиклинали, сложной породами обогащенными углеродистым (органическим) веществом и содержащими сульфидную минерализацию.

## АНАЛИЗ ТЕКСТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для анализа использовано изображение, полученное системой Landsat 8 OLI & TIRS (13 сентября 2017 г. в 01:51:14 в пределах координат  $143^{\circ}00'04.8''$  в.д. и  $63^{\circ}48'49.4''$  с.ш. (нижний левый угол) и  $143^{\circ}39'01.8''$  в.д. и  $64^{\circ}02'16.3''$  с.ш. (верхний правый угол). Основная часть работы была проведена на базе ГИС ESRI ArcGIS (США), PCI Geomatica Focus (Канада) и LESSA (Россия).

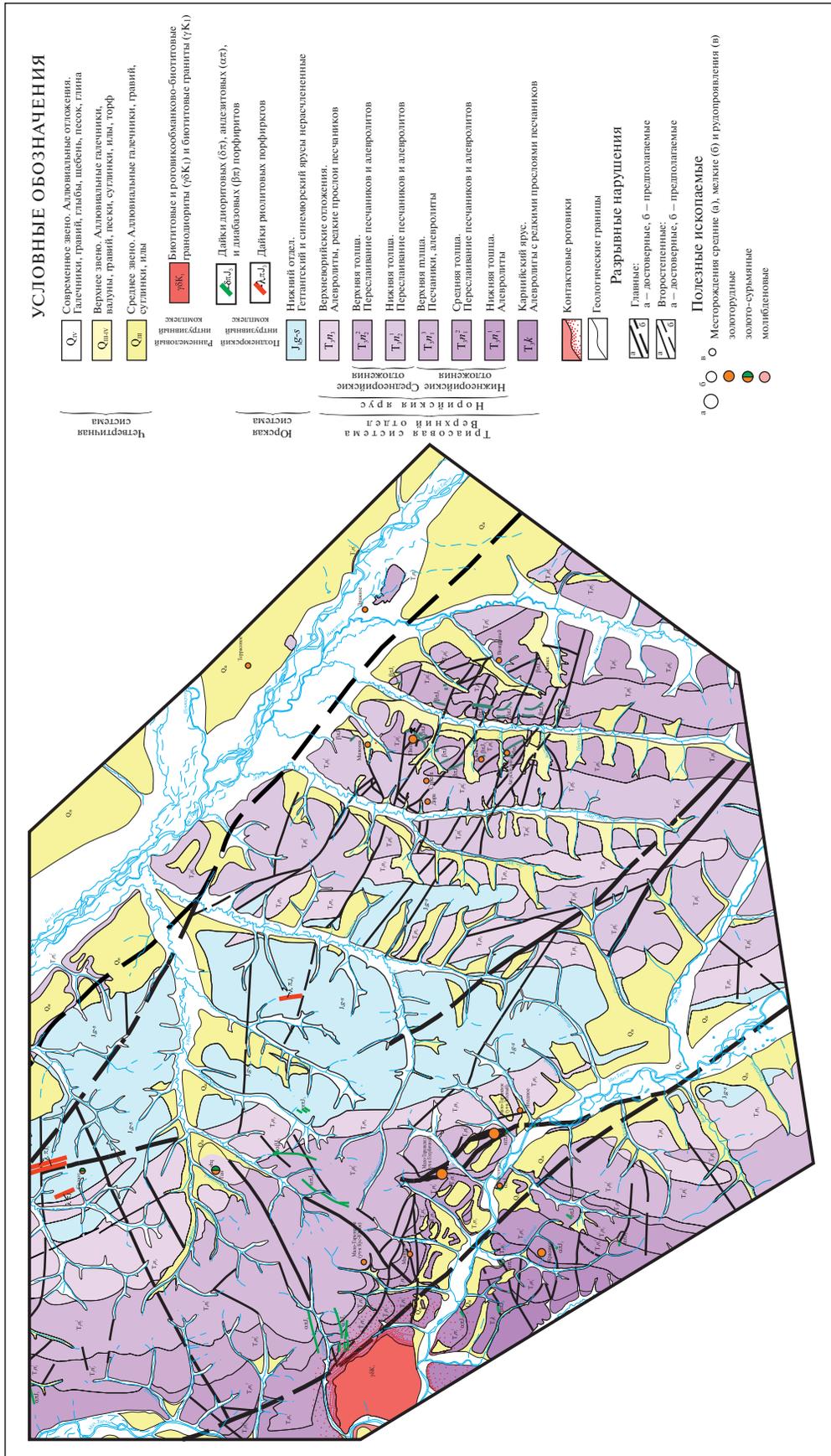
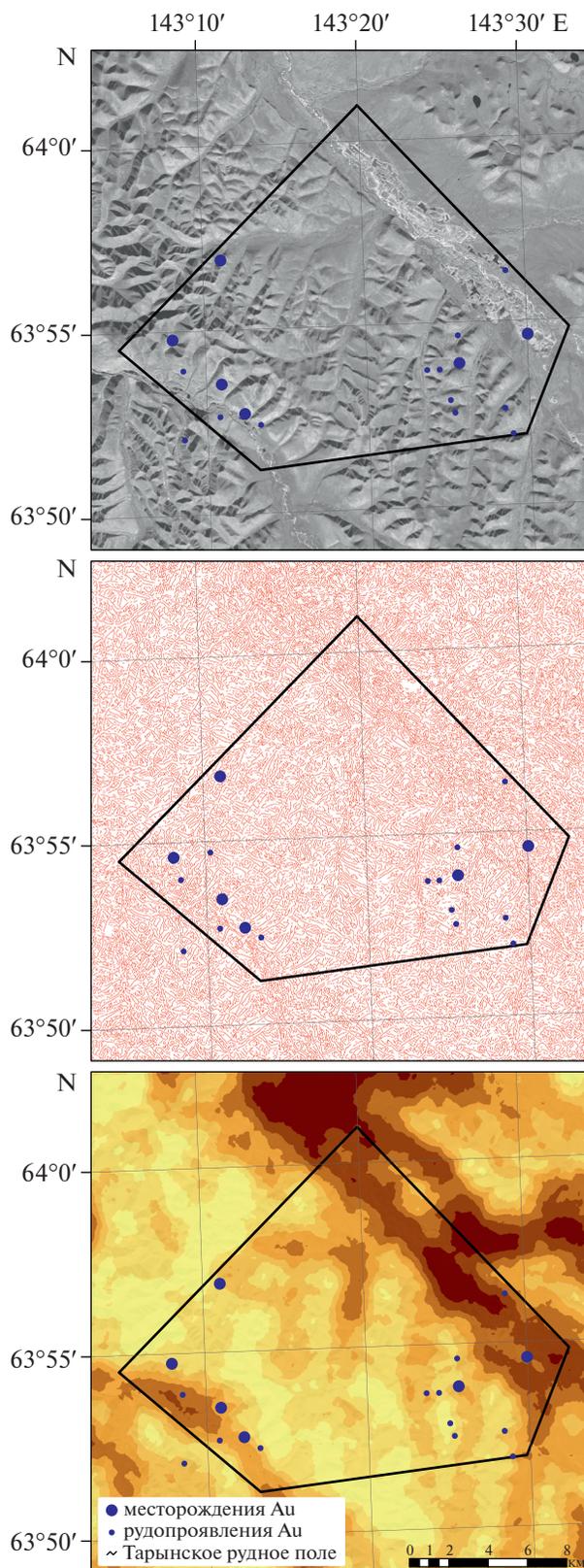


Рис. 1. Геологическая карта Тарынского рудного поля.

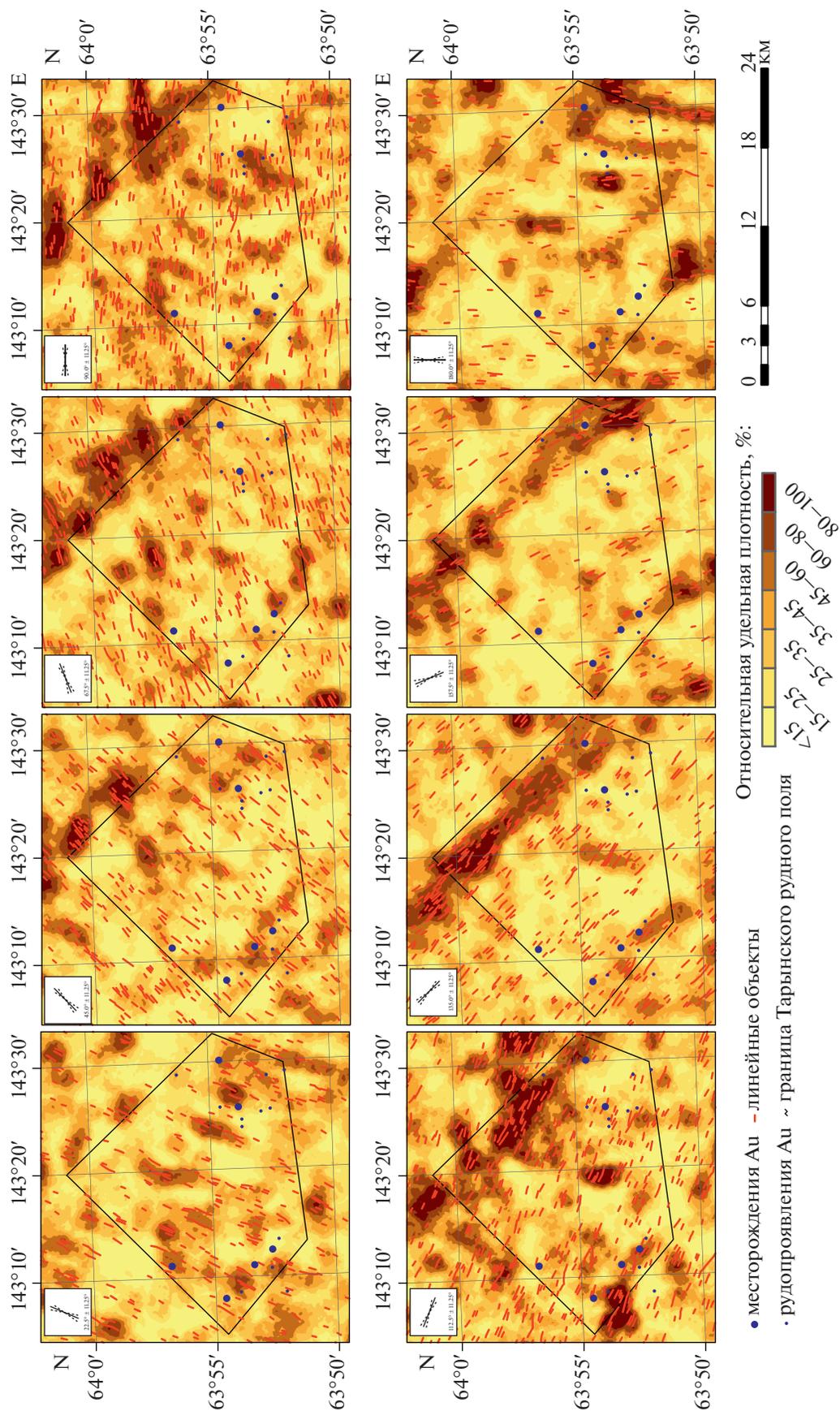


**Рис. 2.** Линейные объекты (в центре), выделенные на панхроматическом изображении Landsat 8 (сверху) и карта их удельной плотности (снизу).

Цель анализа текстурных характеристик — выявить, как локально преобладающие направления распределяются по территории, какие ее участки однородны по ориентационным свойствам, где проявляются аномальные зоны и линии и т.п.

Технология, используемая для линейamentного анализа, названная LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis), позволяет в едином ключе анализировать ориентационные характеристики на растровых изображениях и ЦМР (Златопольский, 2008). Измерение ориентационных характеристик в LESSA производится путем выявления линейных элементов (штрихов) — спрямленных границ полутоновых областей в изображении и хребтов/долин в ЦМР, а направление штриха определяется в каждой его точке. В скользящем окне строятся роза-диаграммы, отражающие распределение штрихов по направлению, а также рассчитываются и многие производные характеристики. Результаты автоматизированного выделения линейных объектов в пределах Тарынского рудного поля представлены на рис. 2. Всего было идентифицировано 24971 прямолинейных объекта со средней длиной 355 м. На основании пространственного положения этих объектов была построена карта удельных плотностей линейamentов (рис. 2). На карте отчетливо наблюдается участок меньшей плотности, обрамленный по периферии областью с более высокой удельной плотностью линейных объектов. Предположительно, уменьшение количества линейamentов в этой области связано с наличием на глубине не вскрытой, выделенной по геофизическим данным, глубинной интрузии, о которой речь пойдет несколько позже.

Для проведения дальнейшего анализа каждому сегменту линейamentов был определен и присвоен в виде атрибута истинный азимут его простирания ( $0^\circ \leq \text{аз. пр.} < 180^\circ$ ). На основании этого атрибута были построены 8 карт относительных плотностей линейamentов с азимутами  $22.5 \pm 11.25^\circ$ ,  $45 \pm 11.25^\circ$ ,  $67.5 \pm 11.25^\circ$ ,  $90 \pm 11.25^\circ$ ,  $112.5 \pm 11.25^\circ$ ,  $135 \pm 11.25^\circ$ ,  $157.5 \pm 11.25^\circ$  и  $180 \pm 11.25^\circ$  (рис. 9). На всех картах выделяются максимумы относительной плотности линейamentов выстраивающиеся в линейные “цепочки” и образующие некоторые тренды. Как правило, подобные тренды образуются множеством сближенных сонаправленных линейamentов. Соответственно, линейные максимумы (тренды) плотности, совпадающие по азимуту с линейamentами, будут маркировать крупные линейные геологические объекты. Так, к примеру, на рис. 9 в СВ части исследуемого рудного поля хорошо заметен линейный тренд максимумов плотности простираний с СЗ на ЮВ в долине реки Большой Тарын. Этот тренд соответствует крупной региональной зоне разломов — Адыча-Тарынской. Подобный тренд субмериди-



**Рис. 3.** Линеаменты на картах плотностей восьми различных ориентировок (слева направо, сверху вниз):  $22.5 \pm 11.5^\circ$ ,  $45 \pm 11.5^\circ$ ,  $67.5 \pm 11.5^\circ$ ,  $90 \pm 11.5^\circ$ ,  $112.5 \pm 11.5^\circ$ ,  $135 \pm 11.5^\circ$ ,  $157.5 \pm 11.5^\circ$  и  $180 \pm 11.5^\circ$ .

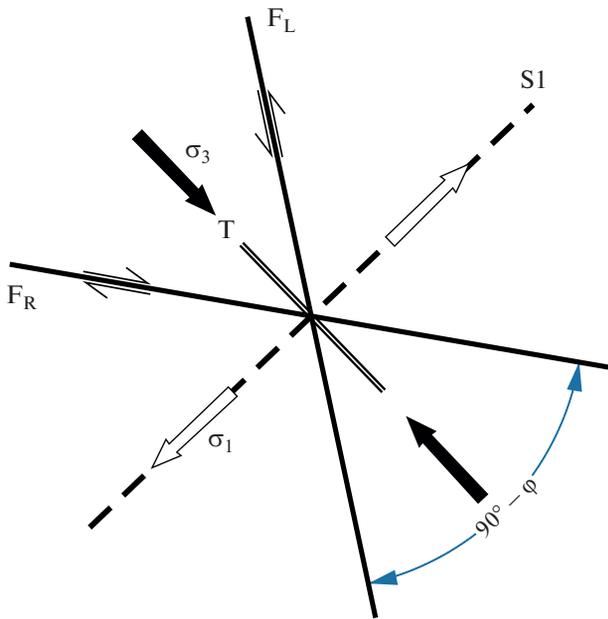


Рис. 4. Механизм чистого сдвига (Модель Андерсона).

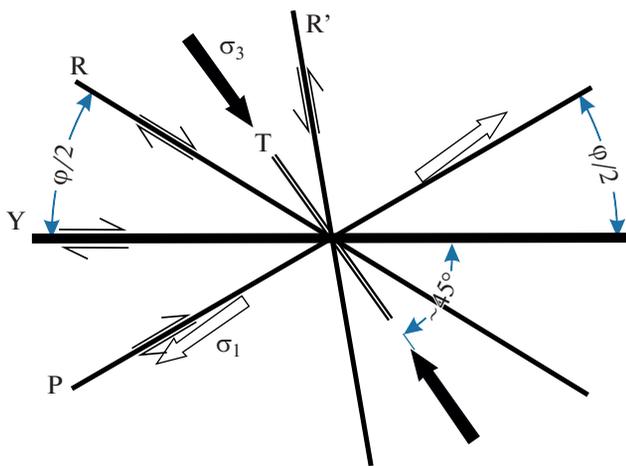


Рис. 5. Механизм простого сдвига, предложенный В. Риделем.

онального простирания обнаруживается в крайней левой части участка – долине реки Малый Тарын.

С целью увеличения детальности и исключения идентификации техногенных объектов (дорог, теплотрасс, ЛЭП и пр.). Характер каждого линеамента на участках сгущения определялся путем наложения на панхроматический космоснимок и определялся характер каждого линеамента. Во многих случаях крупным линеаментам соответствуют долины небольших водотоков: предполагается, что в таких случаях реки и ручьи наследуют выходящие на поверхность тектонические нарушения – на участках разуплотненных

пород. Часть линеаментов хорошо трассируется через водоразделы, зачастую, выделяясь на таких участках по оттенку.

Выделенные таким образом линеаменты были разделены на три морфологические группы на основании их размеров: мелкие, средние и крупные. На рис. 9 хорошо видно, что Тарынское рудное поле расположено между двумя крупными линеаментами СЗ–ЮВ простирания. Как уже говорилось выше, крупные линеаменты в долине реки Большой Тарын соответствуют Адыча-Тарынской зоне разломов. Крупный линеамент в долине реки Малый Тарын (в левом нижнем углу Тарынского рудного поля) также, предположительно наследует зону тектонического нарушения. В центральной части рудного поля преобладают линеаменты среднего размера субмеридионального и северо-восточного простирания. Некоторым из них соответствуют долины ручьев Пиль, Малютка, Дора и др. Как правило, такие средние линеаменты ограничиваются крупными линеаментами в долинах рек Большой и Малый Тарын. Мелкие и короткие линеаменты в пределах рудного поля имеют преимущественно субширотную и СЗ–ЮВ ориентировку и ограничиваются средними по размеру линеаментами. Примечательно, что в центральной и восточной частях рудного поля, как и в долине р. Большой Тарын линеаменты ориентированы в СЗ–ЮВ направлении.

### ТРЕЩИНОВАТОСТЬ В ДОЛИНЕ Р. БОЛЬШОЙ ТАРЫН

Для заверки полученных результатов была использована фотография мезоструктурных форм в обнажении в долине р. Б. Тарын, сделанная А.Ф. Читалиным. Фотография для дальнейшего использования было обработано в графическом редакторе базовыми алгоритмами для повышения контрастности, а также избежания ошибок интерпретации (скажем, теней отбрасываемых кустарниками в качестве линейных объектов) Подготовленное таким образом фото было в дальнейшем обработано таким же алгоритмом, что и для космоснимков, что позволило выделить множество разноориентированных линейных объектов. Для всех линейных объектов применен ручной фильтр для удаления ошибочно интерпретированных участков, где на обнажении находятся ветки деревьев или уложен молоток для визуального определения масштаба. Для каждого сегмента полилиний был определен истинный азимут простирания. В дальнейшем для всей совокупности сегментов с определенными азимутами была рассчитана статистика. При расчете статистики, а именно построении роз-диаграмм учитывалась длина каждого сегмента. То есть относительный вес более длинного сегмента при учете распределения был больше, чем относительный вес корот-

кого линейного объекта. По результатам анализа полученных роз-диаграмм были определены 7 основных направлений простираения линейных объектов в долине реки Б. Тарын.

Для интерпретации полученных результатов использовались две модели:

Модель Андерсона – механизм чистого сдвига, изначально предложенный Андерсоном (Anderson, 1905) для объяснения ориентировки разломов в трехосном поле напряжений в однородной среде (рис. 4). Этот механизм предполагает, что система сопряженных левых  $F_L$  и правых  $F_R$  сколов будет формироваться симметрично относительно направления сжатия под углом между ними  $(90^\circ - \varphi)^\circ$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Модель сдвигов В. Риделя (Riedel, 1929), предложенная им для объяснения ориентировки разломов в однородной среде при преобладании касательных напряжений (рис. 5). Модель предполагает формирование в условиях касательных напряжений серий сколов:

- Y-сдвиги (магистральные сдвиги), параллельные направлению сдвига;
- R-сдвиги (сдвиги Риделя) – синтетические сдвиги под  $\angle + \varphi/2$  направлению генерального сдвига;
- P-сдвиги (вторичные сдвиги Риделя) – синтетические сдвиги под  $\angle - \varphi/2$  к направлению генерального сдвига;
- R'-сдвиги (сопряженные сдвиги Риделя) – антитетические сдвиги под  $\angle 90 - \varphi/2$  к направлению генерального сдвига;
- Т-трещины отрыва ( $\angle \sim 45^\circ$  к генеральному сдвигу) – образуются ортогонально направлению растяжения и вдоль направления сжатия.

Наиболее полные модели взаимосвязи разнонаправленных трещин в зонах сдвига рассмотрены в работах (Нансок, 1985; Гинтов, 2005; Семицкий, 2003).

Современные представления о структурах, возникающих в зонах сдвига, обобщены в модели, показанной на рис. 6 (Ребецкий и др., 2017).

Таким образом, в пределах обнажения были выделены 7 типов трещин, предположительно двух стадий формирования (рис. 7): синтетические (аз. пр.  $5^\circ - 25^\circ$ ) и антитетические (аз. пр.  $80^\circ - 100^\circ$ ), трещины кливажа (аз. пр.  $130^\circ - 165^\circ$ ) и трещины отрыва (аз. пр.  $30^\circ - 45^\circ$ ) первой стадии формирования – стадии СВ–ЮЗ сжатия, а также синтетические (аз. пр.  $105^\circ - 125^\circ$  и  $165^\circ - 180^\circ$ ), антитетические (аз. пр.  $55^\circ - 75^\circ$ ) и генеральные левосторонние сдвиги (аз. пр.  $130^\circ - 165^\circ$ ) второй стадии – стадии ВЮВ–ЗСЗ сжатия. То есть, на первом этапе формирования структуры ось сжатия была ориентирована по азимуту  $50^\circ$ , в результате чего сформировались множественные трещины кливажа СЗ–ЮВ простираения и, предположительно, трещины от-

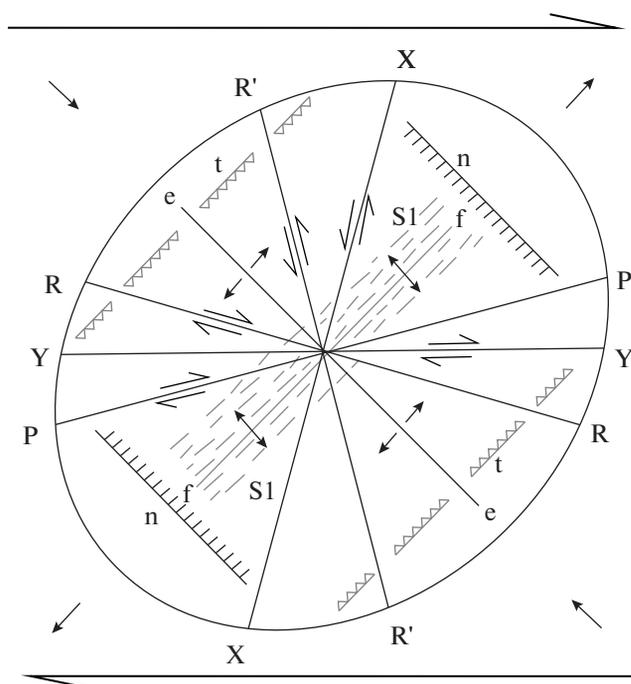


Рис. 6. Прогноз вторичных структур по Ханкоку (принципиальная схема по работам P.L. Hancock) в зоне локализации горизонтального сдвига: R и R' – сопряженные сколы Риделя, Y – магистральные сдвиги, X, P – вторичные сдвиги, e – отрывы, n – сбросы, t – взбросы, f – складки, S1 – кливаж (Ребецкий и др., 2017).

рыва, перпендикулярные им. В дальнейшем происходит смена ориентировки осей напряжений на ВЮВ–ЗСЗ (аз. пр.  $95^\circ$ ), в результате чего возникают левосторонние сдвиговые нарушения, в т.ч. зона Адыча-Тарынского разлома, сонаправленные трещинам кливажа.

### СТЕРЕОГРАММНЫЙ АНАЛИЗ

Для заверки полученных результатов был проведен анализ стереограмм, однако в данном случае в качестве исходных данных использовались не линеаменты, а трещины. Ориентировка трещин определялась в процессе документации ориентированного керна. В пределах месторождения Дрожное ориентировка систем, а также типы трещин и разломов как в обнажениях на дневной поверхности, так и в керне скважин на глубине до 200 м одинаковые.

Ближайшим к точке обнажения участком ведения буровых работ является участок Террасовый месторождения Дрожное, где были пробурены 10 наклонных структурных скважин глубиной до 200 м, поэтому для заверки использовались данные этого участка. Всего в пределах участка Террасовый было произведено 1505 замеров ориентировок трещин. Стереограмма трещиновато-

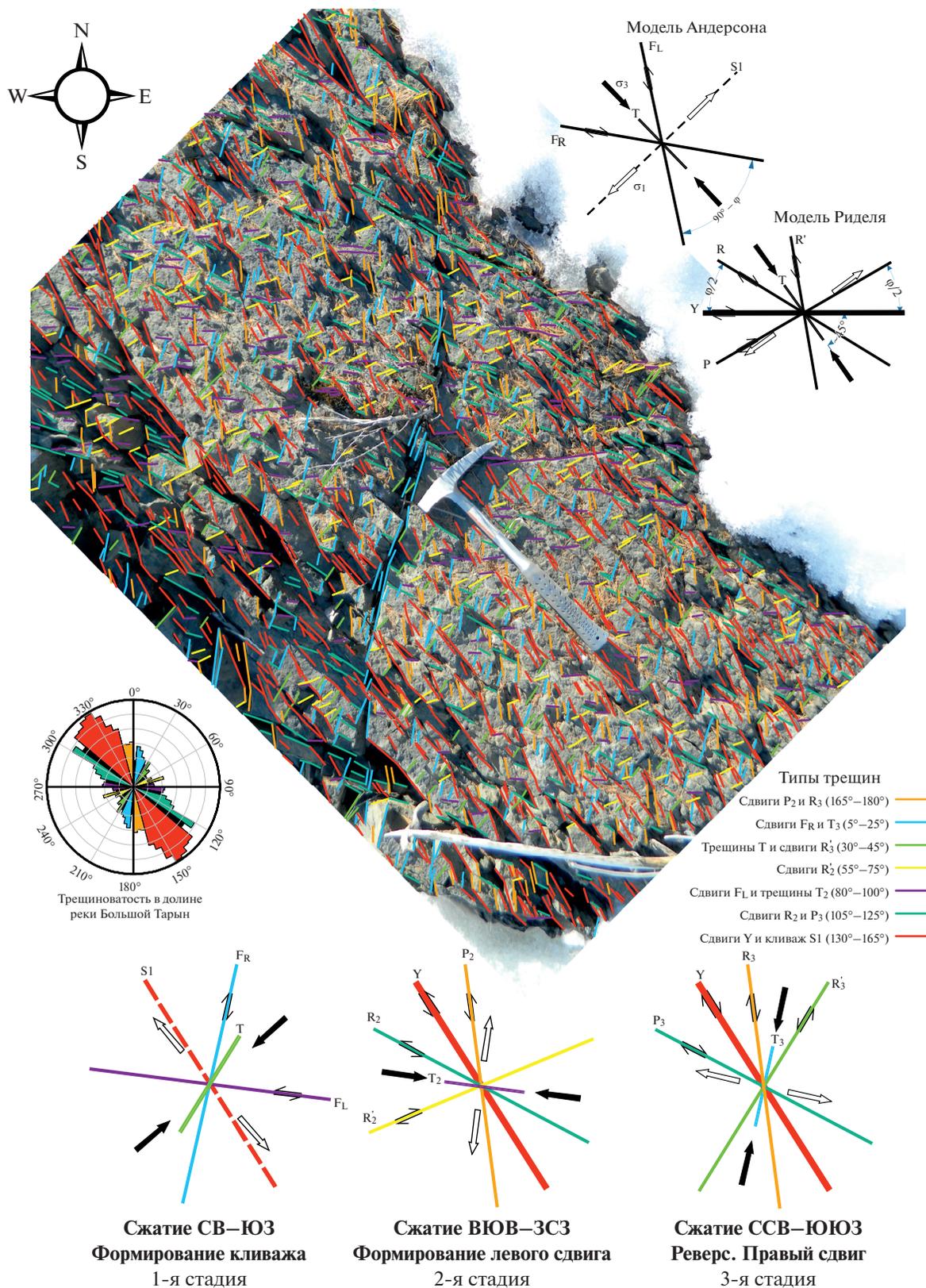


Рис. 7. Интерпретация ориентировки трещиноватости в долине реки Б. Тарын. Фото А.Ф. Читалина, 2016 г.

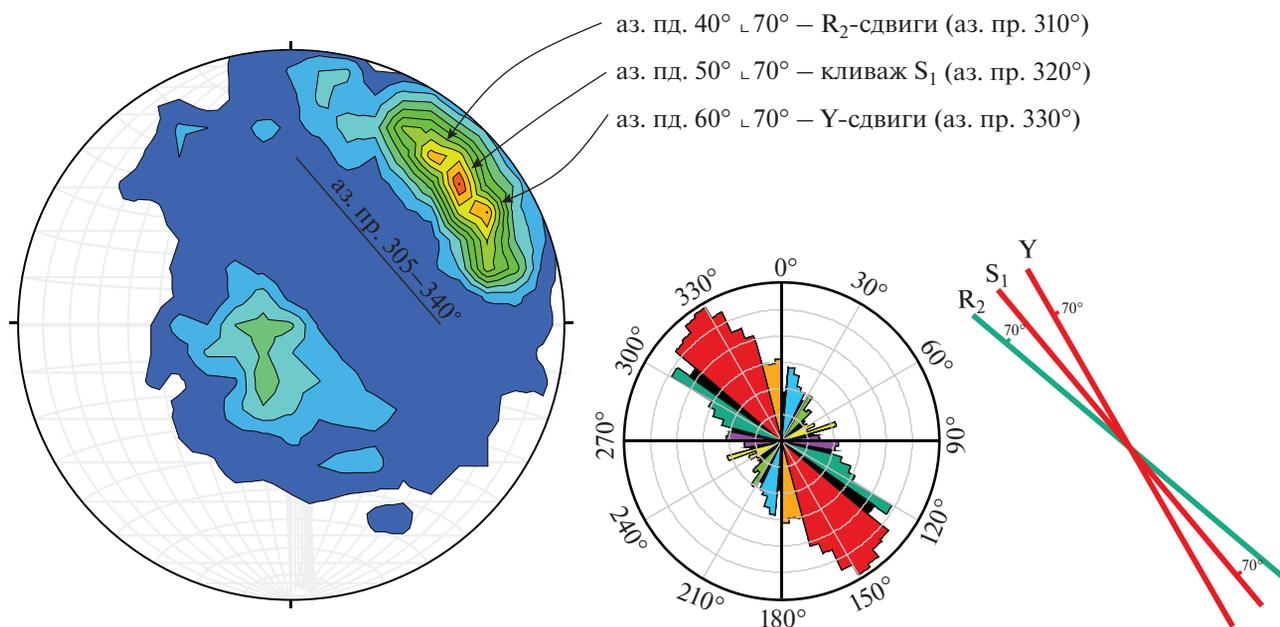


Рис. 8. Стереограмма трещиноватости (верхняя полусфера) участка Террасовый.

сти для этого участка представлена на рис. 8. На стереограмме присутствуют четыре максимума плотности трещин, один из которых (в центральной части стереограммы) отражает систему пологих трещин, которые не могут быть зафиксированы на космоснимках. Три максимума в верхней правой части хорошо заметны, эти максимумы соответствуют трем крутопадающим ( $\angle 70^\circ$ ) системам трещин СЗ–ЮВ простирания (аз. пр.  $305^\circ$ – $340^\circ$ ). По аналогии с интерпретацией фото обнажения можно предположить, что система с ориентировкой аз. пд.  $40^\circ \perp 70^\circ$  соответствует синтетическим сдвигам Риделя второй стадии сжатия  $R_2$  (на рис. 7 сдвиги этой системы окрашены в темно-зеленый цвет). Система с ориентировкой аз. пд.  $50^\circ \perp 70^\circ$ , вероятнее всего, соответствует трещинам кливажа  $S_1$ , окрашенным в красный цвет. Третья система аз. пд.  $60^\circ \perp 70^\circ$  предположительно соответствует генеральным сдвигам  $Y$ , параллельным простиранию Адыча-Тарынской зоны. Угол между сдвигами  $Y$  и  $R_2$ , также, как и на рис. 7, составляет  $20^\circ$ . Остальным системам, выделенным при интерпретации трещиноватости в долине р. Б. Тарын, могут соответствовать максимумы в верхней и нижней частях стереограммы, однако в силу их слабой проявленности интерпретация таких максимумов может быть ошибочной.

В пределах Тарынского рудного поля был проведен анализ линеаментов подобный вышеописанному. Метод основан на анализе роз-диаграмм простирания всех сегментов (10064 сегмента) выделенных на космоснимках линеаментов. На рис. 10 изображена роза-диаграмма азимутов

простираения сегментов (более 10000 сегментов) всех линеаментов, выделенных в пределах исследуемого рудного поля. Четко выделяются три максимума, соответствующие следующим азимутам простирания: ЗСЗ ( $295^\circ$ ), СЗ ( $315^\circ$ ) и С ( $5^\circ$ ). В меньшей степени проявлены максимумы:  $20-40^\circ$ ,  $50-60^\circ$  и  $80-100^\circ$ . Если предположить, что максимум линеаментов с простиранием  $310-320^\circ$  соответствуют линеаментам АТЗ, а остальные максимумы — структурам сдвига и отрыва, то можно с высокой долей уверенности утверждать, что ориентировка осей сжатия, предложенная выше, справедлива и в данном случае.

Так синтетическим сдвигам (сдвигам Риделя) стадии СВ–ЮВ сжатия будут соответствовать линеаменты, образующие на розе-диаграмме максимум голубого цвета (аз. пр.  $0^\circ-20^\circ$ ). Антитетическим сдвигам (сопряженным сдвигам Риделя) будет соответствовать субширотный максимум фиолетового цвета (аз. пр.  $80^\circ-100^\circ$ ). Кливажу  $S_1$ , согласно рис. 10, будет соответствовать самый крупный максимум, окрашенный в красный цвет (аз. пр.  $320^\circ-330^\circ$ ). А максимум светло-зеленого цвета (аз. пр.  $20^\circ-40^\circ$ ) будет соответствовать трещинам отрыва.

Структуры сдвига второй стадии сжатия (ВЮВ–ЗСЗ простирания) также находят отражение на рис. 10. Линеаменты, образующие на роза-диаграмме максимум темно-зеленого цвета (аз. пр.  $290^\circ-310^\circ$ ), соответствуют синтетическим сдвигам 2-й стадии сжатия. Максимум желтого цвета (аз. пр.  $50^\circ-80^\circ$ ) — антитетическим сдвигам (сопряженным сдвигам Риделя). Генеральным сдвигам  $Y$ , соглас-

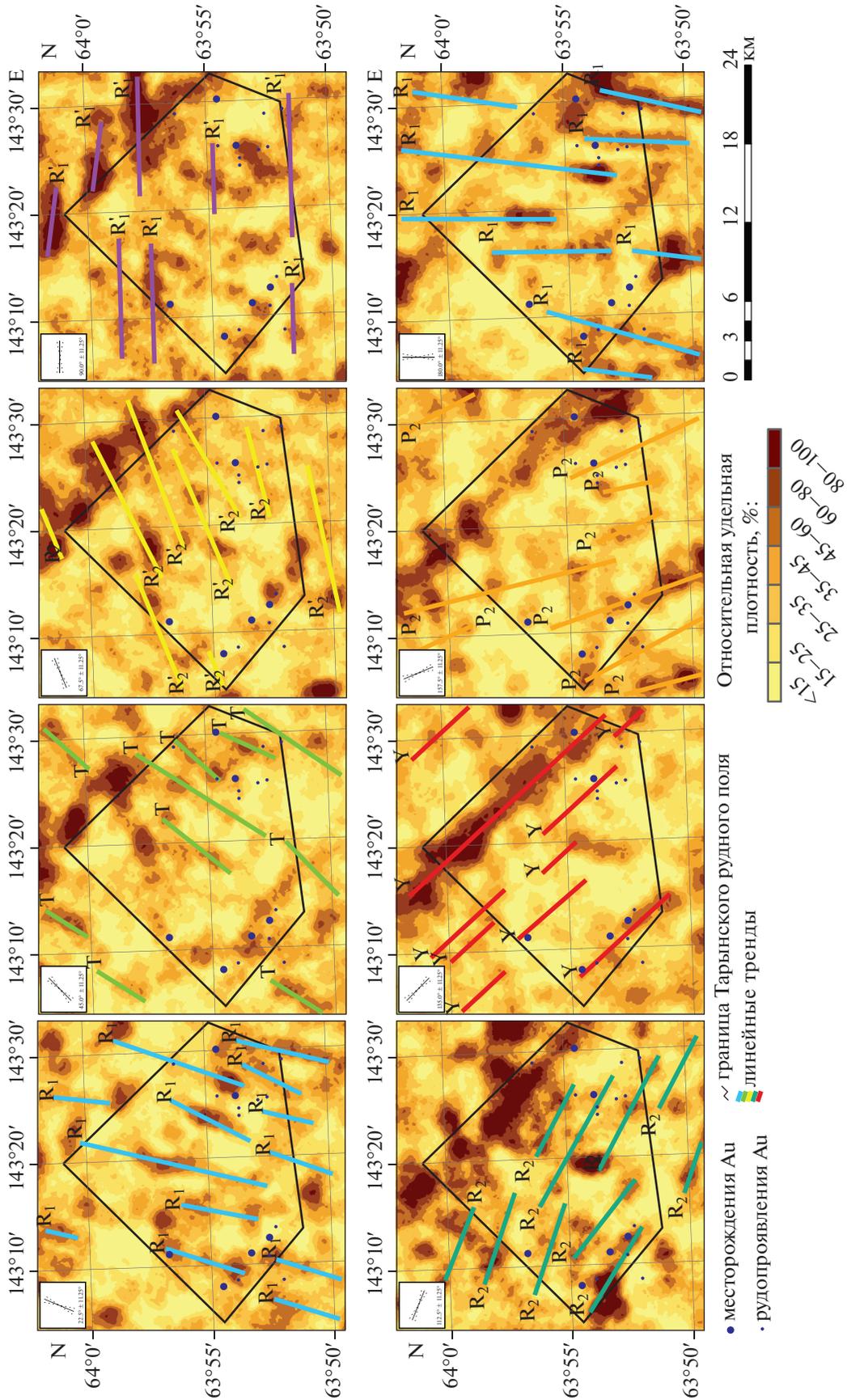


Рис. 9. Карты плотностей линейментов с интерпретацией трендов, выделенных в пределах Тарынского рудного поля, шести различных ориентировок (слева направо, сверху вниз):  $22.5 \pm 11.5^\circ$ ,  $45 \pm 11.5^\circ$ ,  $67.5 \pm 11.5^\circ$ ,  $90 \pm 11.5^\circ$ ,  $112.5 \pm 11.5^\circ$ ,  $135 \pm 11.5^\circ$ ,  $157.5 \pm 11.5^\circ$  и  $180 \pm 11.5^\circ$ .

но рис. 8, будет соответствовать максимум красного цвета (аз. пр.  $300^{\circ}$ – $310^{\circ}$ ). А максимум оранжевого цвета (аз. пр.  $340^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ), проявленный слабее всех, будет соответствовать вторичным сдвигам Риделя.

### РАЗДЕЛЕНИЕ НА ДОМЕНЫ

Для получения представительных результатов расчет статистических показателей производился для объектов разного масштаба, поскольку при слишком большом размере “скользящего окна” затушевываются текстурные характеристики объектов мелкого масштаба, а если это окно будет существенно меньше объекта, оценка характеристик будет производиться не для искомого объекта, а только для его более мелких подструктур.

Оценить ориентационные свойства текстуры исследуемых объектов позволяют линии вытянутости роза-диаграмм. Это наиболее устойчивая характеристика ориентировки объектов (Златопольский, 2008).

Учитывая, что на предыдущих этапах исследования были выделены 3 размерных класса линейных объектов (крупные, средние и мелкие), для анализа пространственного распределения разноориентированных “штрихов”, в пределах ТЗРП при помощи LESSA были построены роза-диаграммы и линии вытянутости методом “скользящего окна” размером  $2000 \times 2000$  м ( $256 \times 256$  пикселей),  $1000 \times 1000$  м ( $128 \times 128$  пикселей) и  $500 \times 500$  м ( $64 \times 64$  пикселя) (см. рис. 11).

При увеличении размера окна количество штрихов, на основании которых и рассчитывается роза-диаграмма, увеличивается, и форма роза-диаграммы сглаживается. На определенных участках такие роза-диаграммы демонстрируют изотропию в ориентировке штрихов, на других напротив – выдержанная ориентировка штрихов становится более обоснованной статистически (Златопольский, 2008).

На рисунке линий вытянутости, рассчитанном “скользящим окном” размером  $256 \times 256$  пикселей, помимо линейной Адыча-Тарынской зоны разломов отчетливо выделяются 4 крупных домена (на северо-западе, северо-востоке, востоке и юге). На подобном же изображении, рассчитанном окном размером  $128 \times 128$  пикселей, можно выделить около 10 доменов среднего размера, АТЗ также выделяется очень отчетливо. На наиболее детальном изображении, рассчитанном окном размером  $64 \times 64$  пикселя, помимо АТЗ, выделяющегося контрастнее других, можно выделить также порядка 20 доменов.

По результатам анализа поведения построенных роз-диаграмм и линий вытянутости в пределах ТЗРП были выделены 15 доменов, различающихся по текстурным характеристикам. Для всех выде-

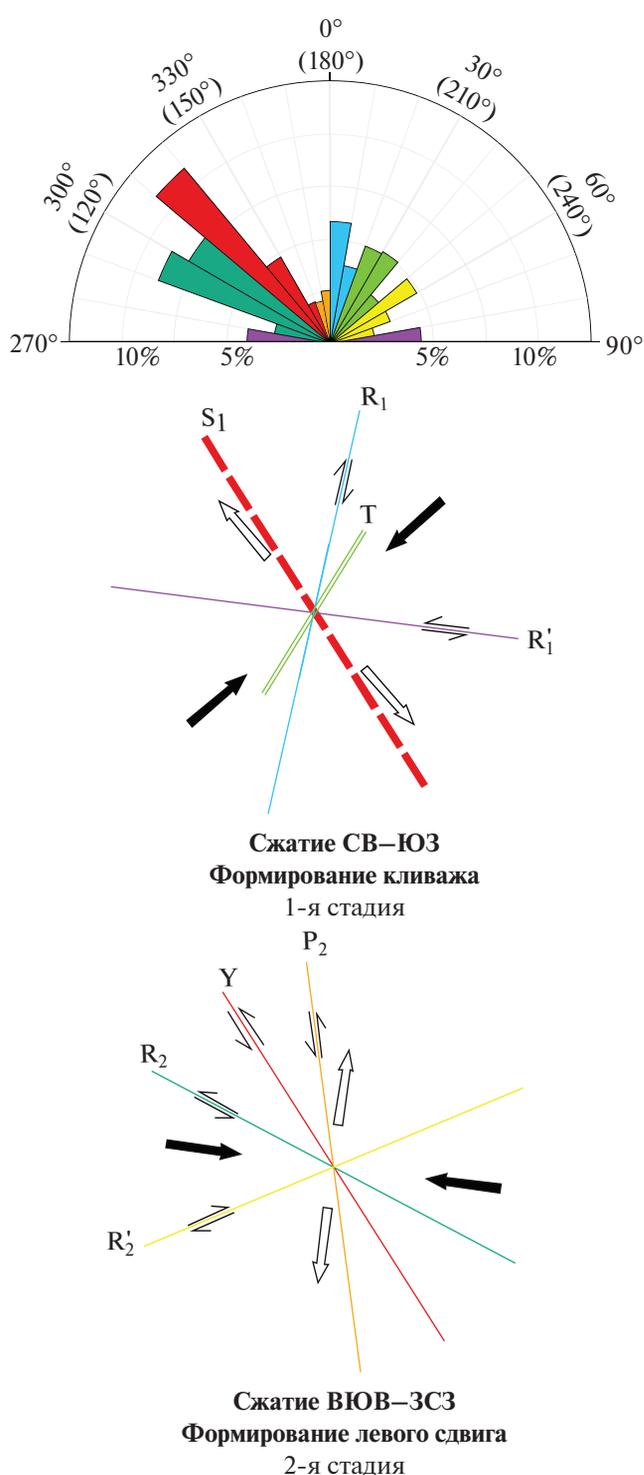


Рис. 10. Роза-диаграмма азимутов простираения линейментов (сверху), выделенных в пределах Тарынского рудного поля и варианты ее интерпретации (снизу).

ленных штрихов в пределах каждого домена были построены обобщенные роза-диаграммы, отражающие основные характеристики текстурных особенностей того или иного домена (см. рис. 12).

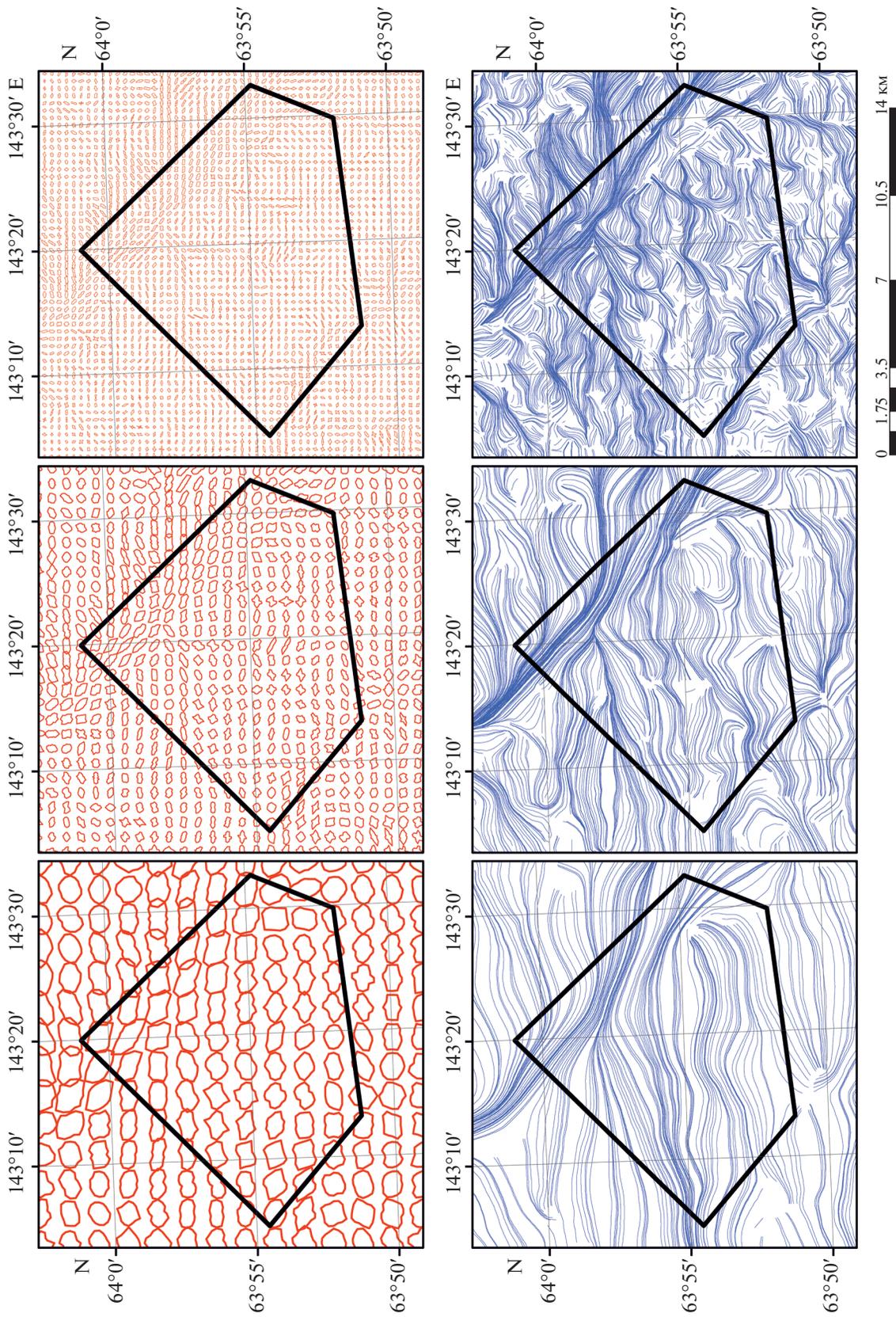


Рис. 11. Розы-диаграммы и линии выпянутости, рассчитанные методом “скользящего окна” размером 2000 × 2000 м (слева), 1000 × 1000 м (в центре) и 500 × 500 м (справа).

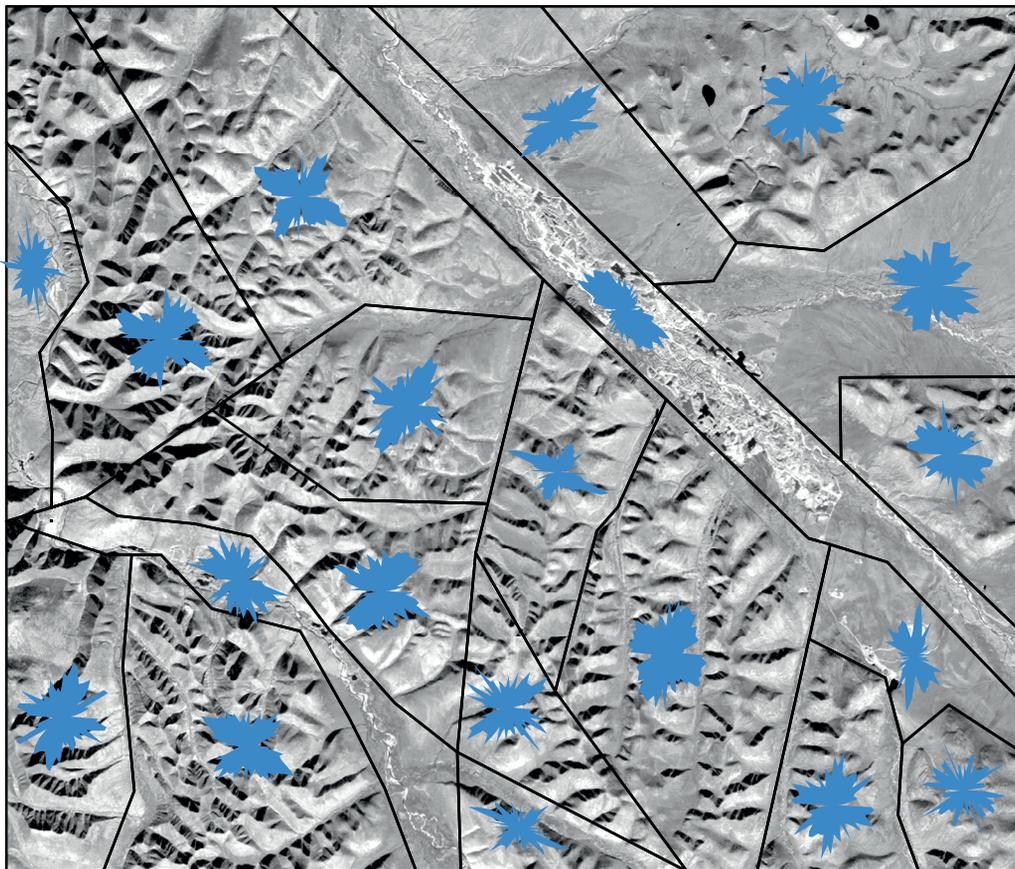


Рис. 12. Преобладающая ориентировка штрихов в пределах выделенных доменов.

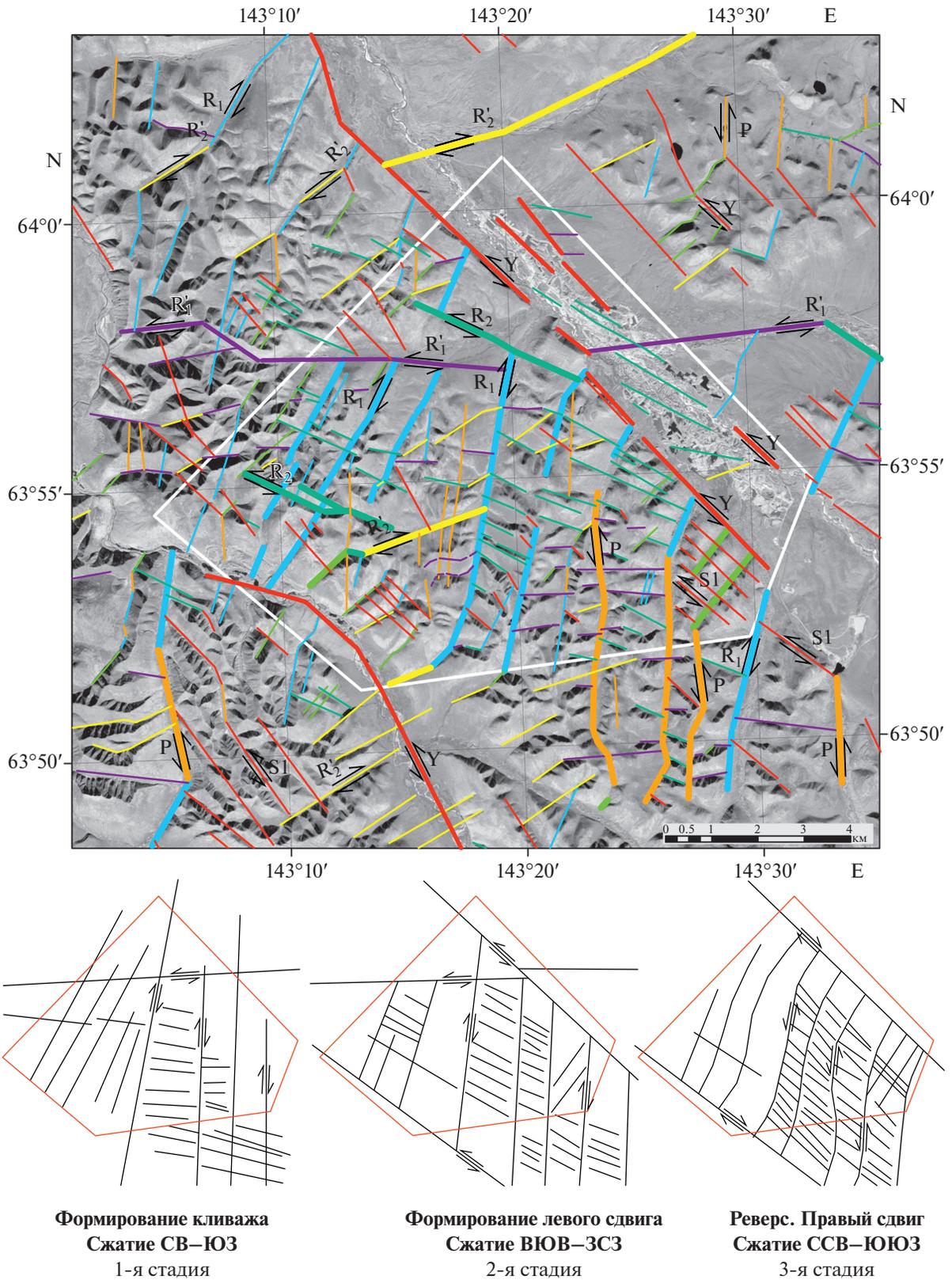
Хорошо заметно, что в долинах рек Большой и Малый Тарын штрихи приобретают СЗ–ЮВ ориентировку, в то время как в северо-восточной части рассматриваемой территории ориентировка штрихов близка к хаотичной. В междуречье Большой и Малого Тарына во всех доменах преобладают два ортогональных друг другу направления: схожее с ориентировкой в долинах (СЗ–ЮВ) и перпендикулярное ему (СВ–ЮЗ). Такое взаиморасположение штрихов может свидетельствовать о наличии серии параллельных тектонических нарушений СВ и СЗ простирания, ограниченного двумя крупными сдвиговыми зонами в долинах крупных рек.

Преобладающая в центральной части ТЗРП СВ ориентировка штрихов и выделенные на предыдущих этапах исследования линеаменты того же простирания свидетельствуют в пользу устойчивого мнения о левосдвиговой кинематики АТЗ. Однако, на основании морфологии линеаментов, среднего размера примыкающих к крупным линеаментам в долинах рек Большой и Малый Тарын (а именно, их нехарактерное для левого сдвига подгибание в обратную сторону) предпо-

лагается реверсивный характер АТЗ. То есть левосторонние движения по дизъюнктивному нарушению сменились правосторонними. Тем не менее, ориентировка подавляющего количества штрихов и линеаментов в центральной части ТЗРП говорит о преобладании левосдвиговой кинематики над правосдвиговой, даже если последняя имела место.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На изображениях, полученных системой Landsat 8, методом компьютерной идентификации было выделено несколько десятков тысяч разноориентированных линейных объектов. Путем расчета роз-диаграмм среди всех разнонаправленных объектов были выделены семь систем, обладающих устойчивыми направлениями. В большинстве случаев протяженным линеаментам соответствуют долины водотоков разных порядков. Предполагается, что реки и ручьи наследуют прямолинейные участки дезинтеграции горных пород, обусловленные выходящими на поверхность тектоническими нарушениями.



**Рис. 13.** Конечный результат интерпретации выделенных линейментов (сверху) со схемой стадийного формирования современной структуры Тарынского рудного поля (снизу).

Интерпретация роли каждой из систем в формировании структуры ТЗРП производилась на основе двух общепринятых механизмов образования тектонических нарушений: модели Андерсона и модели Риделя. Тарынское рудное поле, таким образом, расположено между двух крупных зон сгущения линеаментов СЗ–ЮВ простирания, которые соответствуют региональным зонам разломов, в т.ч. Адыча-Тарынской, в долине реки Большой Тарын. В центральной части рудного поля предполагается наличие серии параллельных тектонических нарушений СВ и СЗ простирания, сопряженных с двумя крупными сдвиговыми зонами в долинах крупных рек. Участки сгущения линейных объектов хорошо заметны на картах удельной плотности, выделяясь в виде вытянутых цепочек максимумов плотности.

Ориентировка сопряженных нарушений свидетельствует о преобладающей левосдвиговой кинематике АТЗ. Тем не менее, существует предположение о реверсивном характере АТЗ, т.е. о том, что левосторонние движения сменились правосторонними, поскольку обнаруживается нехарактерное для левого сдвига подгибание выделенных нарушений в обратную сторону. Однако, левосдвиговая составляющая кинематики, очевидно, преобладала над правосдвиговой, даже если последняя и имела место.

В пределах всего ТЗРП обнаруживаются линеаменты, соответствующие, вероятно, тектоническим нарушениям 3-х стадий сжатия (рис. 13). На первой стадии оси сжатия имели ориентировку СВ–ЮЗ. Формировались кливажные трещины СЗ–ЮВ простирания, субширотные левосторонние сдвиги, а также субмеридиональные правосдвиговые нарушения. В течение второй стадии оси сжатия имели ориентировку ВЮВ–ЗСЗ. Формировались основные крупные левосдвиговые тектонические нарушения, вероятно, наследующие, зоны кливажных разломов и трещин, образованных на первой стадии. Появились синтетические и антитетические сдвиги Риделя. Ориентировка осей сжатия третьей стадии, предположительно, ортогональна ориентировке осей на второй стадии — ВСВ–ЗЮЗ. При подобном взаиморасположении осей произошла смена кинематики тектонических нарушений на обратную, т.е. реверс. Таким образом, левосдвиговые нарушения АТЗ стали правосдвиговыми, а по трещинам отрыва, образовавшимся на первой стадии сжатия произошли подвижки.

Сопоставление результатов линеаментного анализа с результатами интерпретации трещиноватости в обнажениях в долине реки Большой Тарын, а также с данными разведочного бурения показало, что предполагаемое взаиморасположение осей напряжений в пределах Тарынского рудного поля находит свое подтверждение. Можно утверждать,

что ориентировка осей напряжений существовавшая в пределах участка Терассовый характерна и для остальной части рудного поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аристов В.В., Прокофьев В.Ю., Имамендинов Б.Н., Кряжев С.Г., Алексеев В.Ю., Сидоров А.А.* Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дражное (Восточная Якутия, Россия) // Докл. АН. 2015. Т. 464. № 1. С. 65–70.
- Бергер В.И.* Сурьмяные месторождения. М.: Недра, 1978. 292 с.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исслед. Земли из космоса. 2005а. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005б. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
- Владимиров В.Г.* Геологическое строение Адыча-Тарынской зоны и закономерности размещения в ней золото-сурьмяного оруденения. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минерал. наук: 04.00.14. АН СССР. Ин-т минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. М., 1977. 26 с.
- Войтенко В.Н.* Сдвиговые структурные парагенезисы и золотое оруденение Адыча-Тарынского глубинного разлома. М., 2015. Интернет-презентация ([http://www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/subdivisions/506/OMTS/2015/26.02/Voitenko\\_reduce.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/subdivisions/506/OMTS/2015/26.02/Voitenko_reduce.pdf)).
- Гинтов О.Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Златопольский А.А.* Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 102–112.
- Индолев Л.Н., Жданов Ю.Я., Суплецов В.М.* Сурьмяное оруденение Верхояно-Колымской провинции. Новосибирск: Наука, 1980. 230 с.
- Мокшанцев К.Б.* Роль орогенного этапа в развитии платформ и складчатых областей на примере Сибирской платформы и Верхояно-Чукотской области // Тектоника Сибири. Т. III. Тектоника Сибирской платформы. М.: Наука, 1970. С. 27–40.
- Парфенов Л.М.* Геодинамика, магматизм и металлогения Верхояно-Колымских мезозоид. // Закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 15. М., 1988. С. 179–188.
- Прокопьев А.В., Каскевич Г.Э.* Сдвиговые дуплексы Восточной Якутии. Отечественная геология, 2000, № 5. С. 44–46.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. Москва. ГЕОС, 2017. 235 с.

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал "ГЕО", 2003. 243 с.

Читалин А.Ф. Сдвиговая тектоника и золотонность Колымского региона // Золото и технологии. 2016. № 4 (34). С. 122–126.

Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Гришин Е.М., Сивков Д.В., Усенко В.В., Фомичев Е.В., Чикатуева В.Ю. Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дразное // Геофизика. № 3. 2018. С. 106–114.

Шахтыров В.Г. Сдвиговые структурные ансамбли и золотое оруденение Яно-Колымской складчатой системы // Диссертация на соискание ученой степени докто-

ра геолого-минералогических наук. Магадан, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт, 2009. 311 с.

Anderson E.M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. P. 387–402.

Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. Struct. Geol. 1985. V. 7. № 3/4. P. 437–457.

Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. V. 15. P. 483–506.

Riedel W. Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen // Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie B. 1929. P. 354–368.

## The Application of Lineament Analysis to Identify Patterns of Localization of Gold Mineralization within Taryn Gold Field in the Republic of Sakha

D. V. Sivkov<sup>1,2</sup>, A. F. Chitalin<sup>1,2</sup>, and A. L. Dergachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of geotechnology, LLC, Moscow, Russia

The development of geographic information systems and increasing their applications in Geology provide a unique opportunity to optimize the process of lineaments identification on images of the earth's surface using the resources of laptops. The process of selection of primary linear objects is based on their searching in images for linear and relatively extended boundaries between contrasting areas and/or sequences of pixels of the same tone. Such analysis was carried out within a large gold field in Eastern Sakha to identify regional and local lineaments. To interpret the obtained results we used generally accepted models proposed to explain the orientation of faults in a homogeneous medium. Within the entire Taryn gold field lineaments are found, probably corresponding to faults of 3 stages of compression. Comparison of the lineament analysis results with the results of the interpretation of fractures in the outcrops in the Bolshoy Taryn River valley and with the exploration drilling data showed that the alleged interposition of the stress axes is confirmed.

**Keywords:** lineaments, geographic information systems, remote sensing, gold deposits, search features

### REFERENCES

Anderson E.M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. P. 387–402.

Aristov V.V., Prokof'ev V.Yu., Imamendinov B.N., Kryazhev S.G., Alekseev V.Yu., Sidorov A.A. Osobennosti ru-dobrazovaniya na zoloto-kvartsevom mestorozhdenii Drazhnoe (Vostochnaya Yakutiya, Rossiya) [Ore-forming processes in the Drazhnoe gold-quartz deposit (Eastern Yakutia, Russia)] // Doklady AN, 2015. V. 464. № 1. P. 65–70 (In Russian).

Berger V.I. Sur'myanye mestorozhdeniya. [Stibium deposits] Moscow: Nedra, 1978. 292 p. (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. Metod prognozirovaniya zemletryaseniya na osnove lineamentnogo analiza kosmicheskikh izobrazheniy [A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images] // Doklady Earth Sciences, 2005a. V. 402. № 4. P. 561–567 (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. Kosmicheskii metod prognoza zemletryaseniya na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov [A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2005b. № 3. P. 37–52 (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registrirovannykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmopasnykh territoriy [Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2007. № 1. P. 47–56 (In Russian).

Chitalin A.F. Sdvigovaya tektonika i zolotonosnost' Kolym'skogo regiona [Shear tectonics and gold content of the Kolyma region] // Zoloto i tekhnologii. 2016. № 4(34). P. 122–126 (In Russian).

Chitalin A.F., Voskresenskiy K.I., Grishin E.M., Sivkov D.V., Usenko V.V., Fomichev E.V., Chikatuева V.Yu. Strukturno-kinematicheskaya model' zolotorudnogo mestorozhdeniya Drazhnoe [Structural kinematical model of Drazhnoe gold deposit] // Geofizika. № 3. 2018. P. 106–114 (In Russian).

Gintov O.B. Polevaya tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformatsiy zemnoy kory Ukrainy. [Field tectonophysics and its application in studies of crustal deformation in Ukraine]. Kiev: Feniks. 2005. 572 p. (In Russian).

Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. Struct. Geol. 1985. V. 7. № 3/4. P. 437–457.

Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. V. 15. P. 483–506.

- Indolev L.N., Zhdanov Yu.Ya., Supletsov V.M.* Sur'myanoe orudnenie Verhoyano-Kolymской provintsii. [Stibium mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma province]. Novosibirsk: Nauka, 1980. 230 p. (In Russian).
- Mokshantsev K.B.* Rol' orogenogo etapa v razviti platform i skladchatykh oblastey na primere Sibirskoy platformy i Verhoyano-Chukotskoy oblasti [The role of the orogenic stage in the development of platforms and folded areas on the example of the Siberian platform and the Verkhoyansk-Chukchi region] // Tektonika Sibiri. V. III. Tektonika Sibirskoy platformy. Moscow.: Nauka, 1970. P. 27–40 (In Russian).
- Parfenov L.M.* Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Verhoyano-Kolymских mezozoid [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozooids] // Zakonomernosti razmescheniya poleznykh iskopayemykh. V. 15. Moscow. 1988. P. 179–188 (In Russian).
- Prokop'ev A.B., Kaskevich G.E.* Sdvigovye dupleksy Vostochnoy Yakutii [Shift duplexes of East Yakutia]. Otechestvennaya geologiya. 2000. № 5. P. 44–46 (In Russian).
- Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. [From gliding planes to tectonic stress]. Metodiki i algoritmy. Moscow. GEOS. 2017. 235 p. (In Russian).
- Riedel W.* Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen // Zentral-blatt fur Mineralogie, Geologie und Paleontologie B. 1929. P. 354–368.
- Seminskiy K.Zh.* Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon: tektonofizicheskiy aspekt. [The internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect.]. Novosibirsk, SO RAN. GEO. 2003. 243 p. (In Russian).
- Shahtyrov V.G.* Sdvigovye strukturnye ansambli i zolotoe orudnenie Yano-Kolymской skladchatoy sistemy [Shear structural ensembles and gold mineralization in the Yano-Kolyma fold system] // Extended Abstract Doctoral (Geol.) Dissertation. Magadan, Severo-Vostochnyy kompleksnyy nauchno-issledovatel'skiy institute. 2009. 311 p. (In Russian).
- Vladimirov V.G.* Geologicheskoe stroenie Adycha-Tarynskoy zony i zakonomernosti razmescheniya v ney zoloto-sur'myanogo orudneniya. [The geological structure of the Adycha-Taryn zone and the patterns of gold-antimony mineralization placement]. Extended Abstract Doctoral (Geol.) Dissertation. AN SSSR. Institut mineralogii, geokhimii i kristallogimii redkikh elementov. Moscow. 1977. 26 p. (In Russian).
- Voytenko V.N.* Sdvigovye strukturnye paragenezisy i zolotoe orudnenie Adycha-Tarynskogo glubinnogo razloma. [Shear structural paragenesis and gold mineralization of the Adycha-Taryn deep fault] Moscow. 2015. Online presentation ([http://www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/subdivisions/506/OMTS/2015/26.02/Voytenko\\_reduce.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/subdivisions/506/OMTS/2015/26.02/Voytenko_reduce.pdf)) (In Russian).
- Zlatopol'skiy A.A.* Metodika izmereniya orientatsionnykh harakteristik dannykh distantsionnogo zondirovaniya (tehnologiya LESSA) [Remote sensing data orientation characteristics measuring method (LESSA technology)] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2008. № 5. V. 1. P. 102–112 (In Russian).