



Российская Академия Наук

Прогнозно-поисковая модель урановорудного участка Туюкан на основе комплексной интерпретации данных дистанционного зондирования Земли

**Устинов Степан Андреевич*¹, Гребёнкин Н.А.², Петров В.А.¹, Кочкин И.А.¹,
Чепчугов А.М.^{1,2}, Шухов В.В.¹**

¹ ИГЕМ РАН, г. Москва, ² ФГБУ «ВИМС», г. Москва

****stevesa@mail.ru***

**Двадцать третья международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

10 - 14 ноября 2025 г., ИКИ РАН, г. Москва



Объект исследования – район Туяканского рудного узла (ТРУ, Лист ГКК О-49-ХII)

Иркутская область

Мамско-Чуйский район Иркутской области

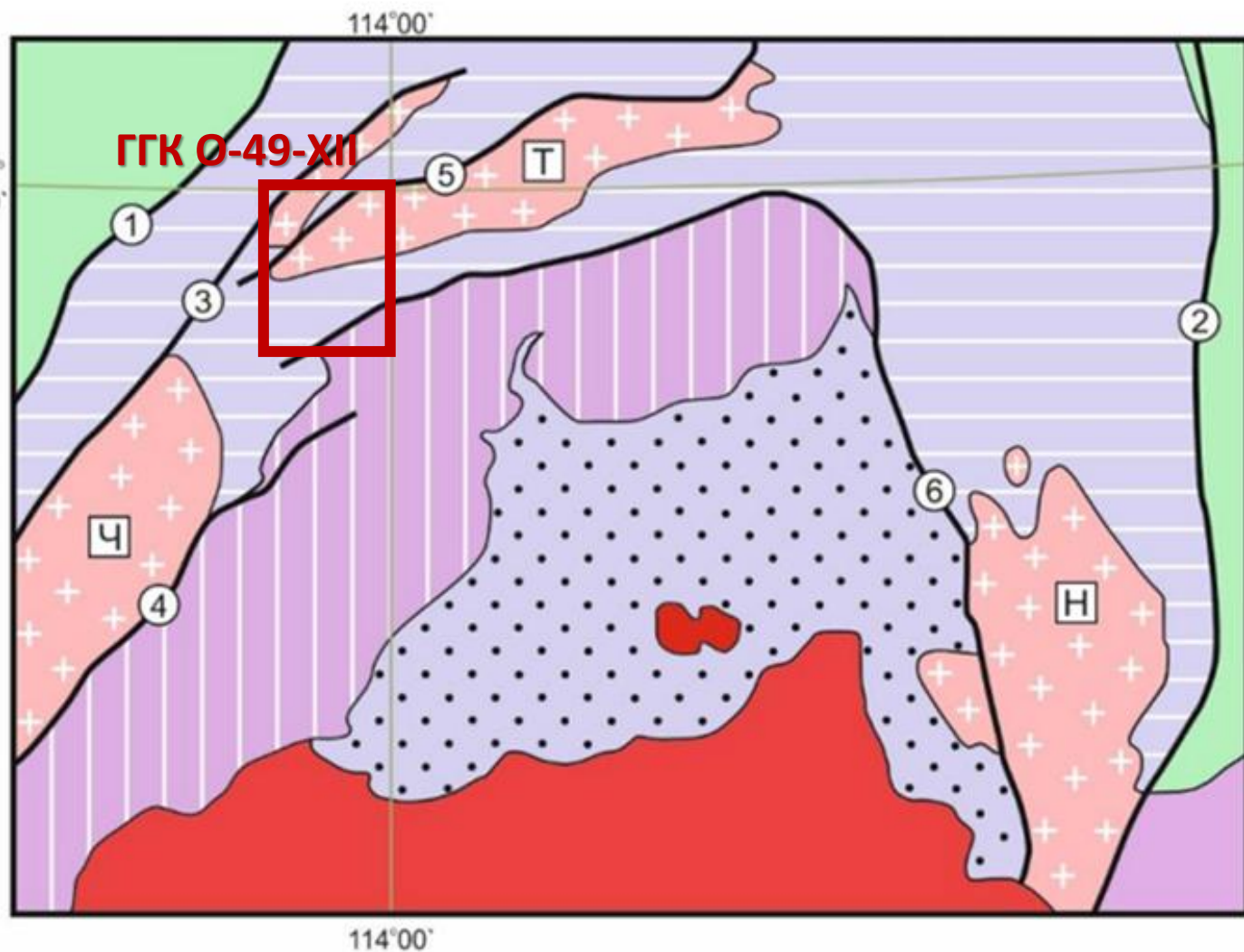
Патомское нагорье

Среднегорный гольцовый массив с глубокими речными долинами

Район экономически слабо освоен, до основных рудных объектов нет постоянных дорог



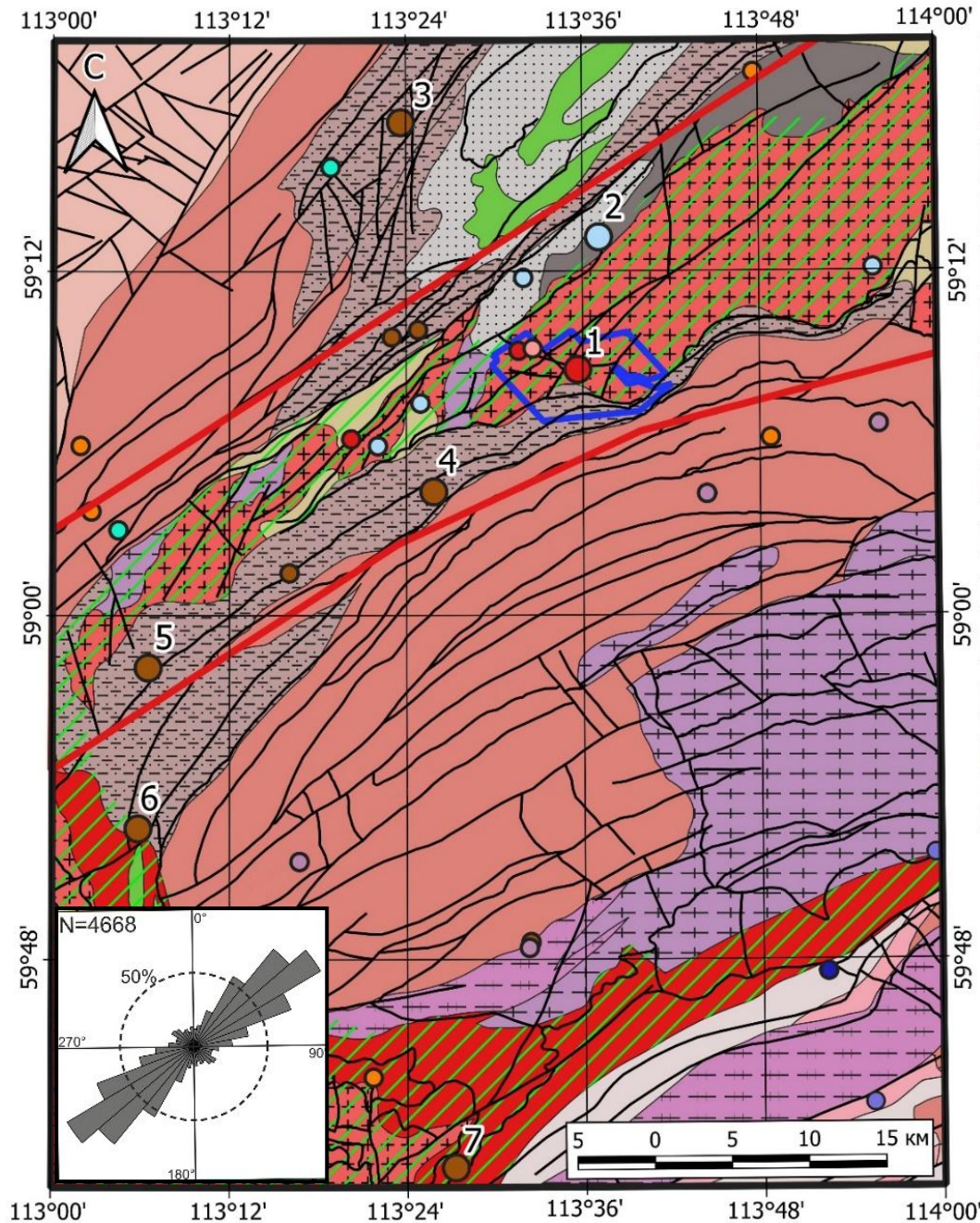
Структурно-тектоническая схема Северного Забайкалья (Макарьев и др., 2019*)



- 1 – плита Сибирской платформы;
- 2 – Алданский щит;
- 3-5 – Саяно-Байкальская складчатая область:
 - 3 – рифейские структурно-формационные комплексы Прибайкальско-Патомского перикратонного прогиба (а) и Олоkit-Бодайбинской палеорифтовой зоны (б);
 - 4 – карельские структурно-формационные комплексы Чуйского (Ч), Тонодского (Т) и Нечерского (Н) гранитоидно-метаморфических поднятий;
 - 5 – позднеархейские-раннекарельские объединенные структурно-формационные комплексы;
 - 6 – палеозойский Ангаро-Витимский ареал-плутон;
 - 7 – главные разломы (1 – Аkitкано-Джербинский, 2 – Жуинский; 3 – Туюканский, 4 – Чуйский, 5 – Алканский, 6 – Чипикетско-Нечерский).

*Макарьев Л.Б., Ефремова У.С., Крымский Р.Ш., Сергеев С.А. Возраст и стадийность уранового оруденения Туюканского рудного узла (Тонодский район, Северное Забайкалье) // Регион. геология и металлогения. – 2019. – № 77. – С. 67–74.

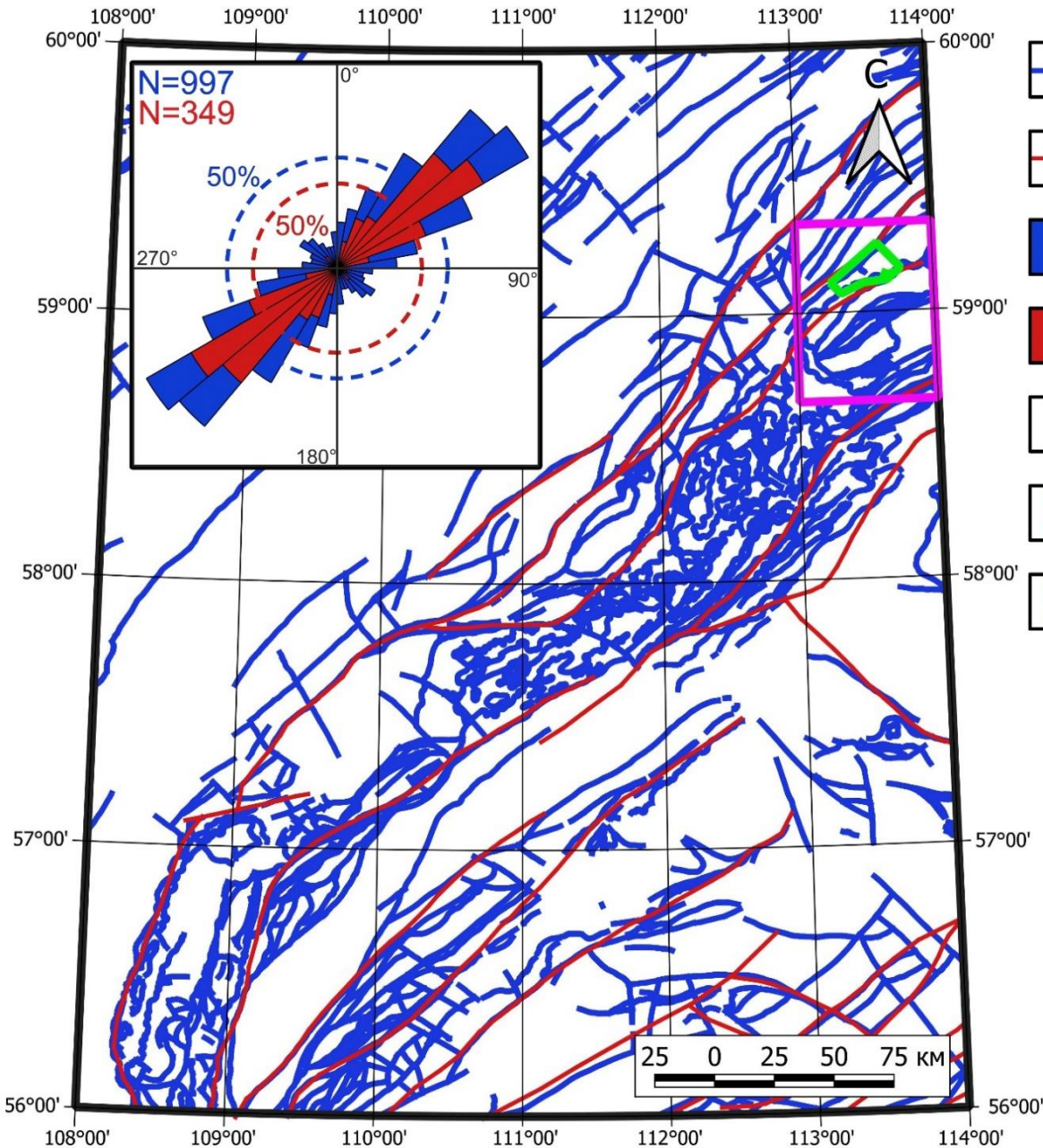
Схематическая геологическая карта района Туяканского рудного узла (площадь ГГК О-49-ХII)






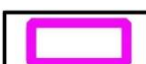



Тектонические особенности

- Многочисленные разрывные нарушения развивались полициклично и некоторые из них сохраняют активность до настоящего времени.
- Разрывные нарушения северо-западной ориентировки, несмотря на четкую выраженность в рельефе, изучены слабо и выявляются в основном по геофизическим и дистанционным данным.
- Преобладание северо-западной вергентности поверхностей сместителей разрывных нарушений главных направлений согласуется с вергентностью складчатых структур, что свидетельствует об их взаимосвязи.
- В результате полевых работ и проведенного геологического картирования северо-западные разломы однозначно идентифицированы как левые сдвиги.
- Сформировались мощные (до 1 км) зоны катаклаза, милонитизации и рассланцевания пород. Современная гидросеть часто наследует и определяется разрывными нарушениями.

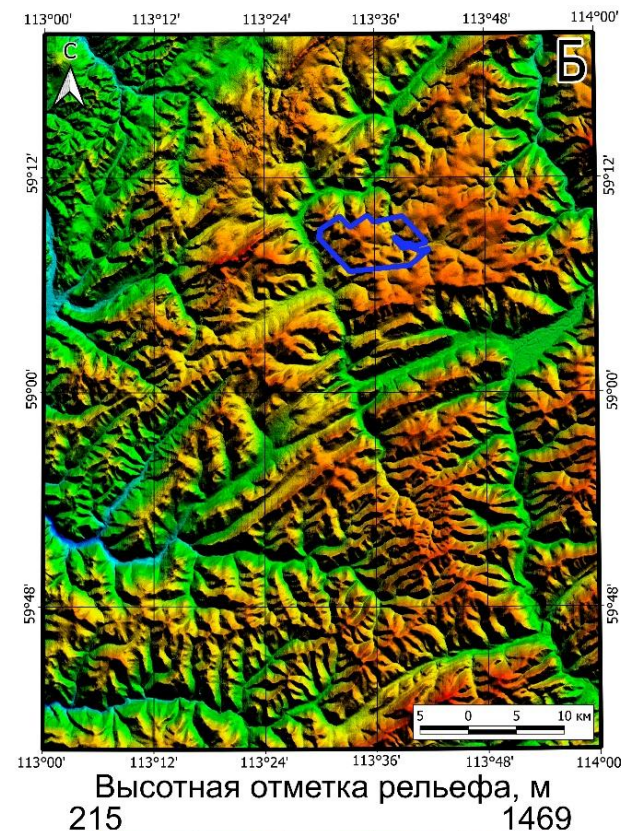
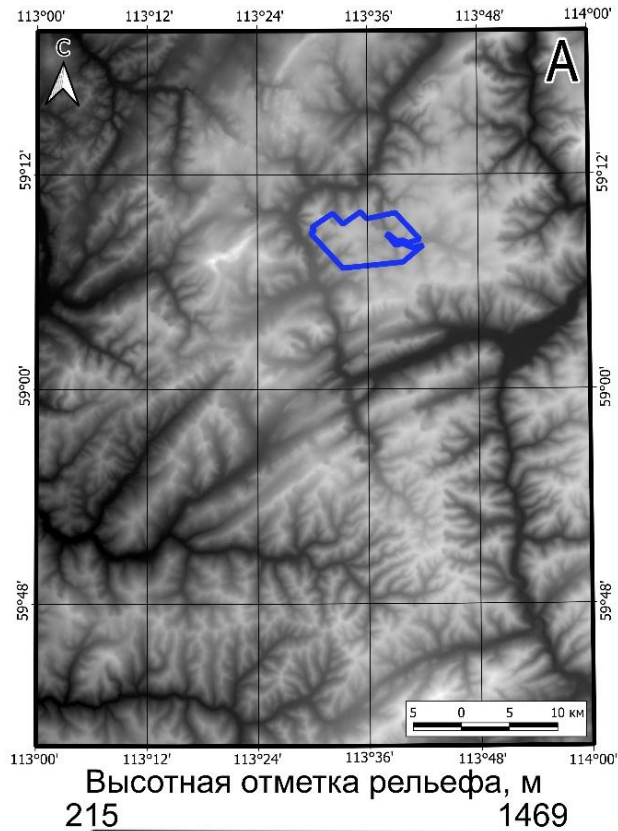
Пространственный сравнительный анализ региональных разрывных нарушений и неотектонических разрывных структур (площадь листа ГКК О-49)



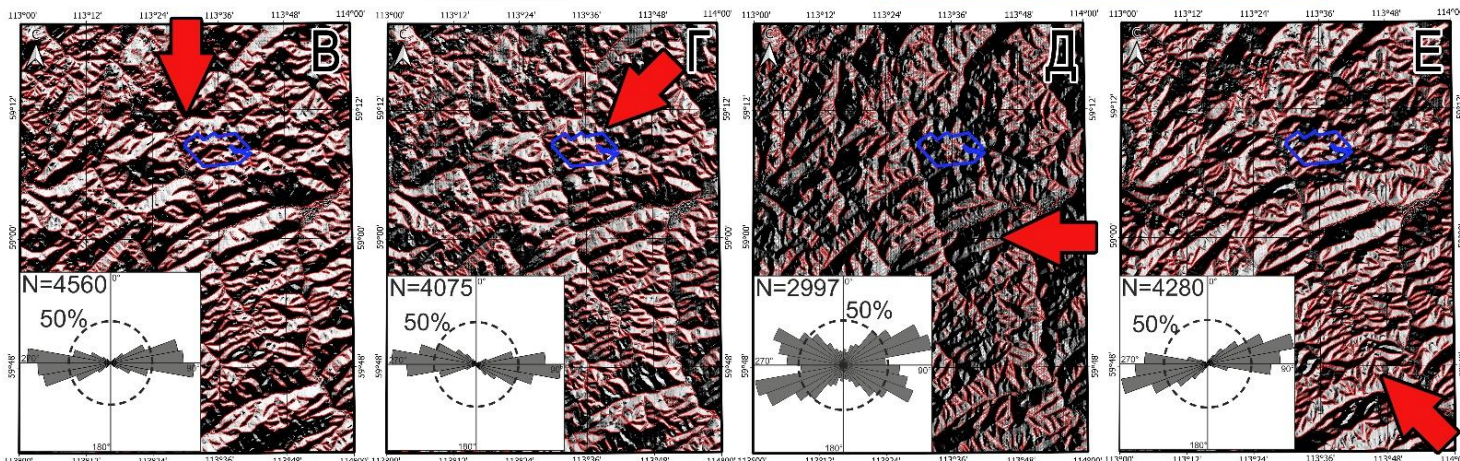
-  1 – региональные разрывные нарушения;
-  2 – неотектонические разрывные нарушения;
-  3 – роза-диаграмма ориентировки региональных разрывных нарушений;
-  4 – роза-диаграмма ориентировки неотектонических разрывных нарушений;
-  5 – граница листа ГКК О-49;
-  6 – граница листа ГКК О-49-ХII (объект исследования);
-  7 – перспективный участок Туюкан.

Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 –Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 607 с.

Автоматическое выделение линеаментов на основе цифровой модели рельефа (ЦМР)



- А – исходные данные ЦМР SRTM (Shuttle radar topographic mission);
- Б – визуализация ЦМР;
- В-Е – Схемы теневого рельефа района ТРУ построенные по результатам нелинейной направленной фильтрации изображения цифровой модели рельефа по четырем основным направлениям:
- В) С-Ю – 0°
- Г) СВ-ЮЗ – 45°
- Д) В-З – 90°
- Е) ЮВ-СЗ – 135°

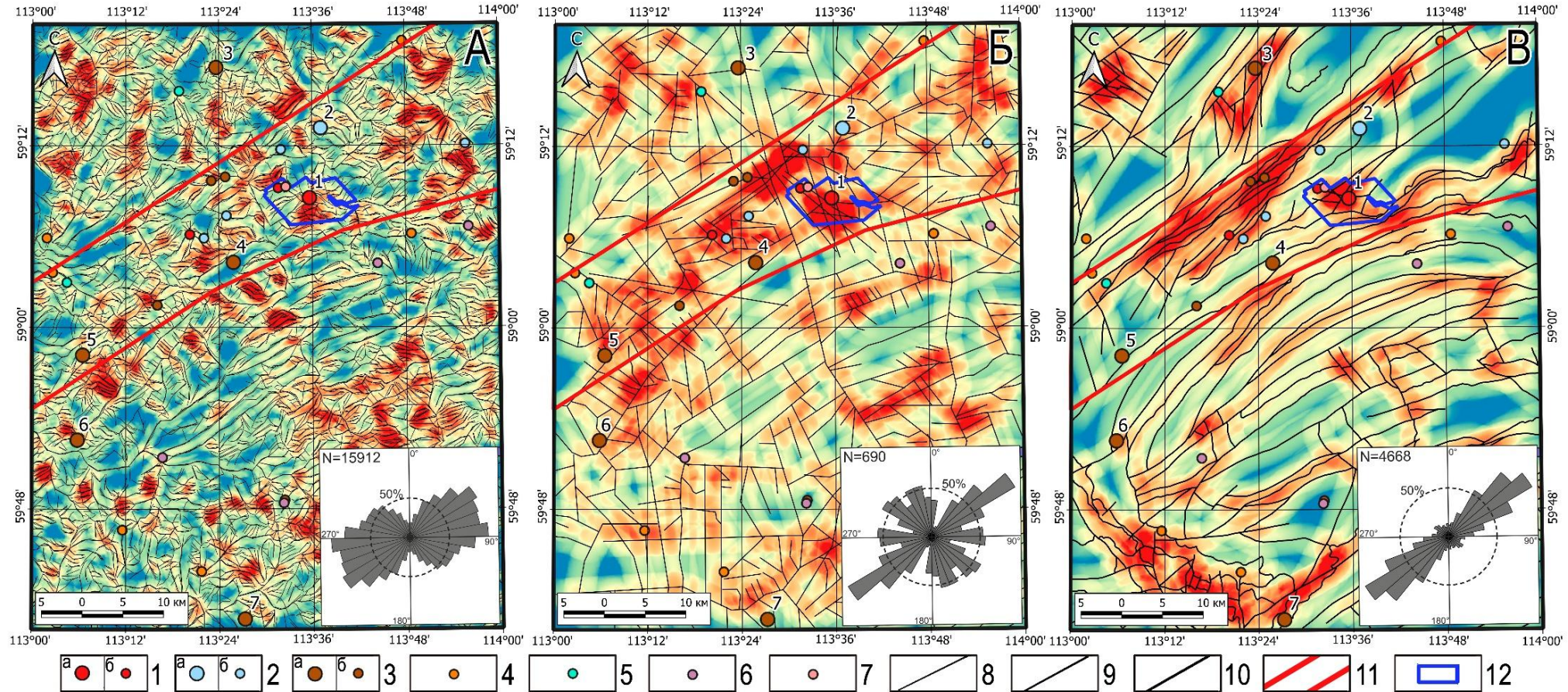


Liping Y., Xingimin M. and Xiaoqiang Z. SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32. №. 14. P. 3875-3896.

Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria. Geod. Cartogr. 2021. 47. P. 34-44.

Пространственный анализ выявленных линеаментов и известных разломов на основе построения схем плотностей объектов и роз-диаграмм для:

А – линеаментов, выделенных нейронной сетью*; Б – линеаментов, выделенных ручным способом; В – известных разломов (ГГК О-49-ХII)



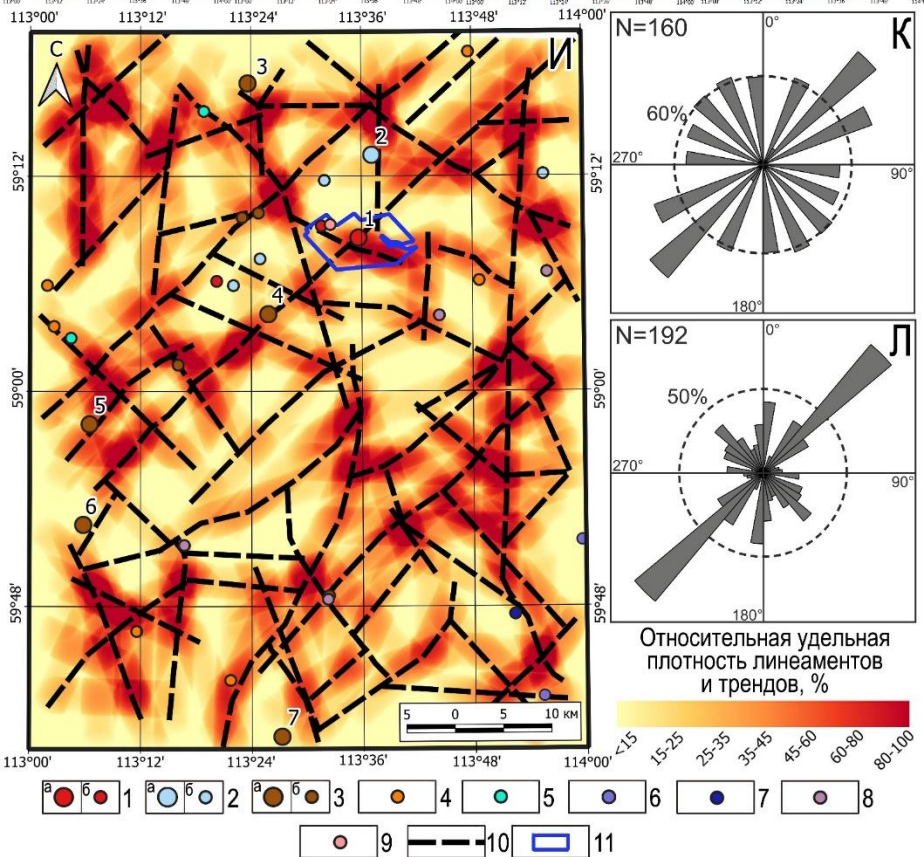
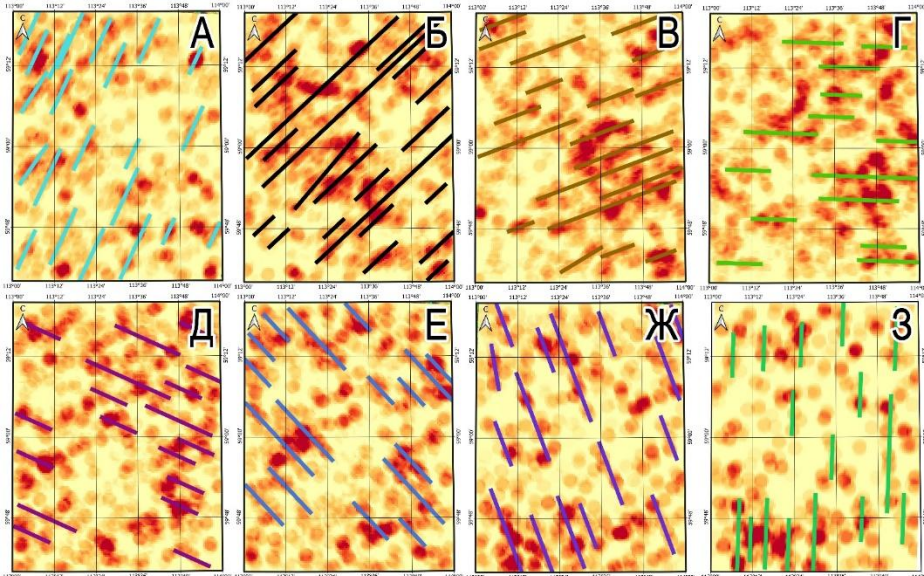
1-3 – месторождения (а) и рудопроявления (б): 1 – урана, 2 – олова, 3 – железа; 4-7 – рудопроявления: 4 – золота, 5 – меди, 6 – титана, 7 – вольфрама; 8 – линеаменты, выделенные нейронной сетью, 9 – линеаменты, выделенные оператором, 10 – региональные разрывные нарушения по ГГК О-49-ХII; 11 – условные границы Тонодского гранитоидно-метаморфического поднятия; 12 – перспективный Туюканский участок.

***Схемы относительных удельных плотностей линеаментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (показаны жирными линиями разных цветов) А-З:**

А) 11°-34°; Б) 33,5°-56,5°;

В) 56°-79°; Г) 78,5°-101,5°; Д) 101°-124°;

Е) 123,5°-146,5°; Ж) 146°-169°; З) 168,5°-11,5°



И) схема относительной удельной плотности всех выявленных трендов и её интерпретация с выявлением крупных зон разломов;

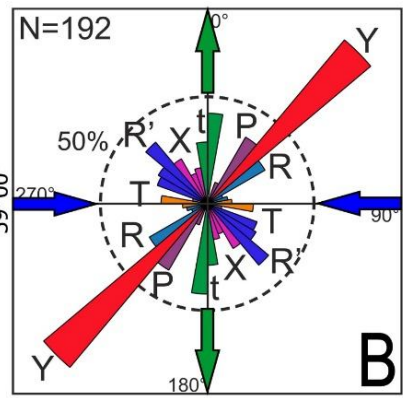
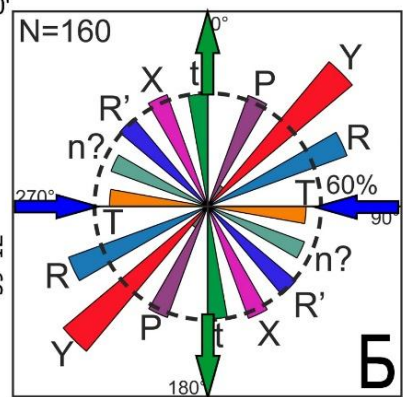
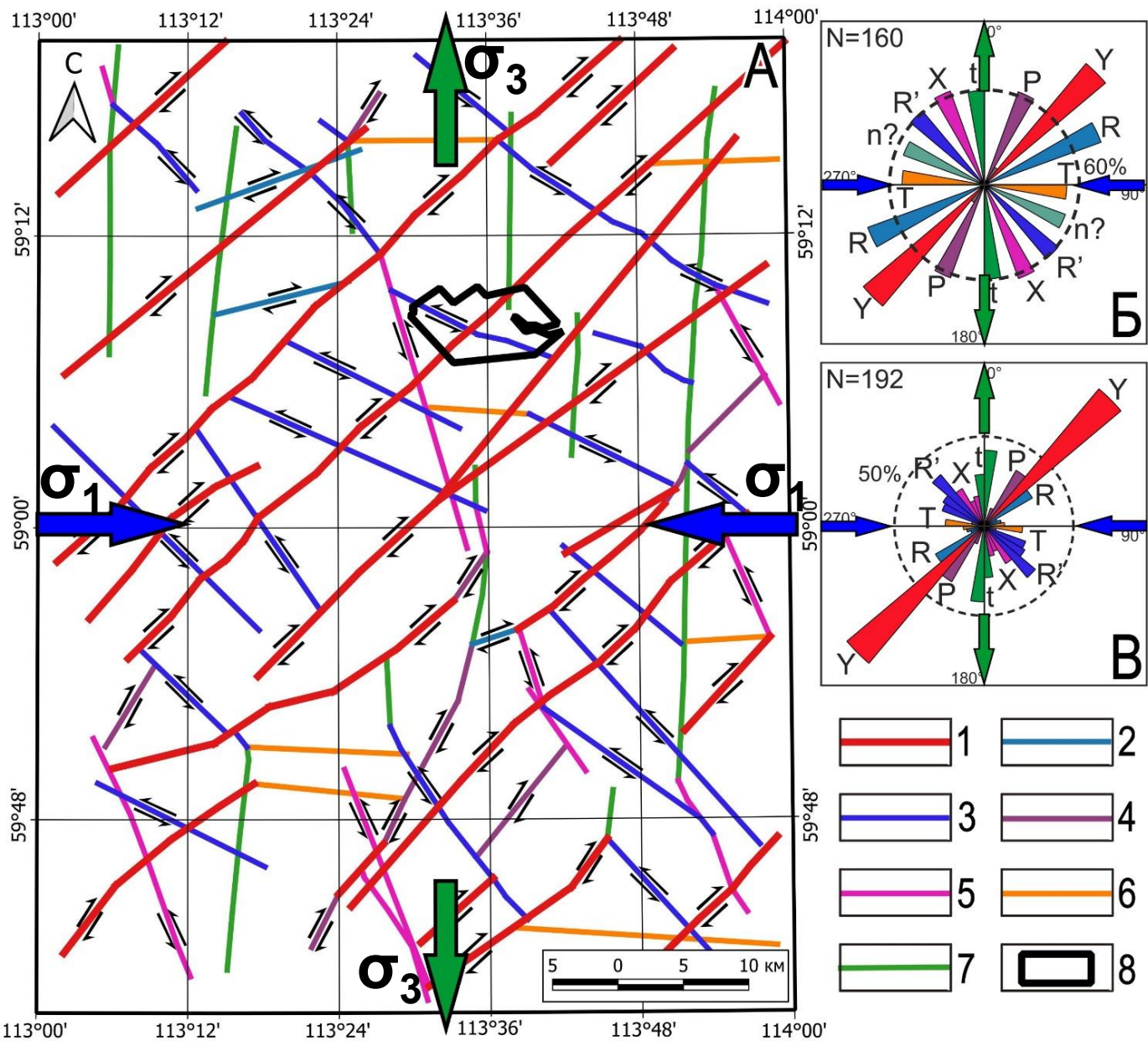
К) роза-диаграмма ориентировки трендов линеаментов;

Л) Роза диаграмма предполагаемых разломных зон на основе анализа схемы плотности трендов линеаментов.

***По методике:**

Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линеаментного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. – 2020. – № 1. – С. 3-19.

Интерпретация каркаса выявленных разрывных нарушений листа ГКК О-49-ХII на основе модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) с помощью ПО «Lineament Stress Calculator» (автор – А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН)



А – схема проведенной реконструкции ориентировок региональных осей максимального сжатия и растяжения, а также кинематики разрывных структур

Б – интерпретация розы-диаграммы ориентировки выявленных трендов линеаментов.

В – интерпретация розы-диаграммы ориентировки выявленных по трендам линеаментов разломных зон

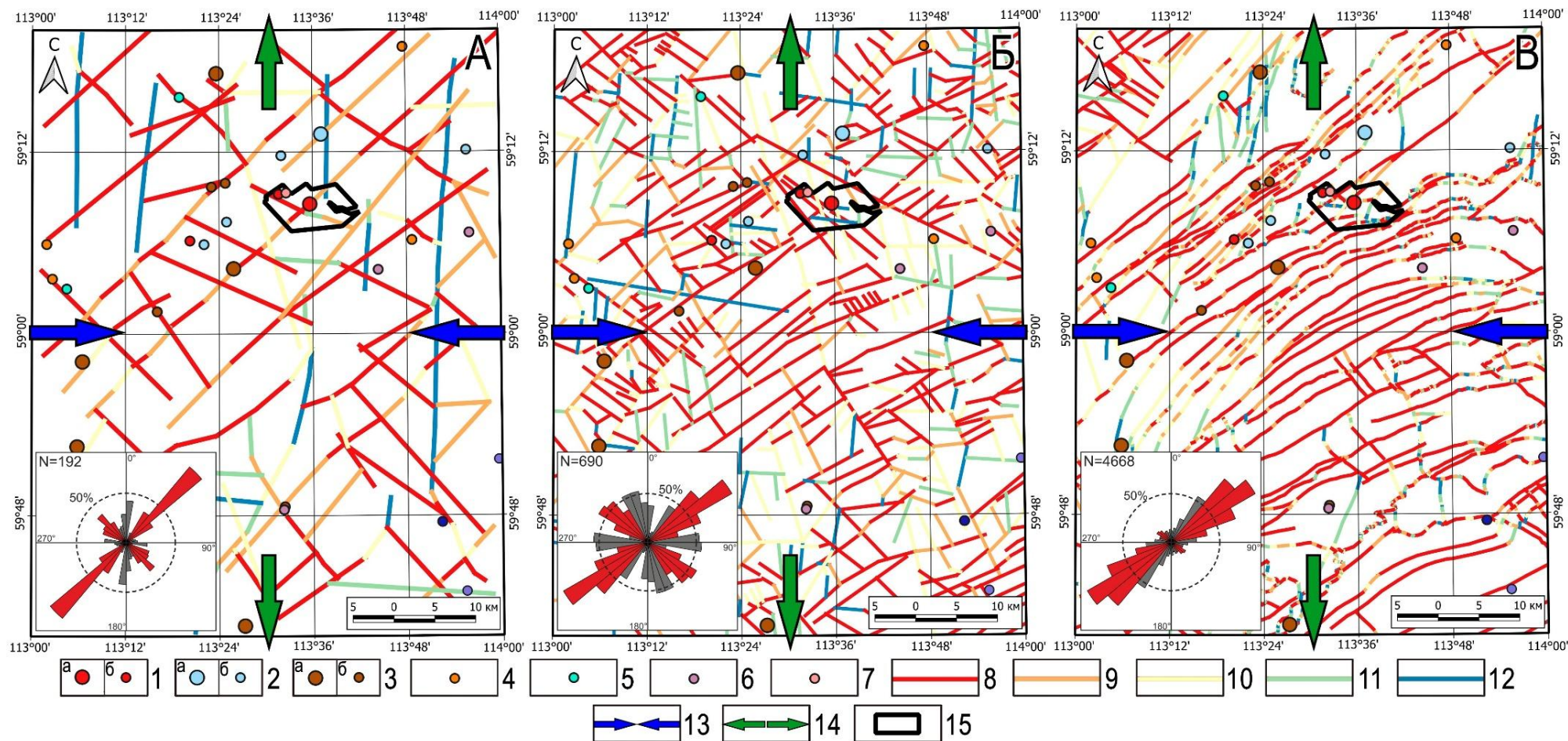
- 1 – магистральные сдвиги (Y);
- 2 – сколы Риделя (R);
- 3 – антириделевские сколы (R');
- 4 – вторичные сдвиги, совпадающие по кинематике с магистральными сдвигами (P);
- 5 – вторичные сдвиги с обратной кинематикой относительно магистральных сдвигов (X);
- 6 – отрывы (T);
- 7 – взбросы (t);
- 8 – границы перспективного Туюканского участка.

Hancock, P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. – 1985. – V. 7. – N 3/4. – P. 437–457.

Результаты расчета тенденции к сдвигу (μ) для сегментов предполагаемых и известных разрывных структур относительно реконструированных ориентировок региональных анизотропных напряжений

А – предполагаемые разломы, выявленные на основе интерпретации трендов линейных элементов;

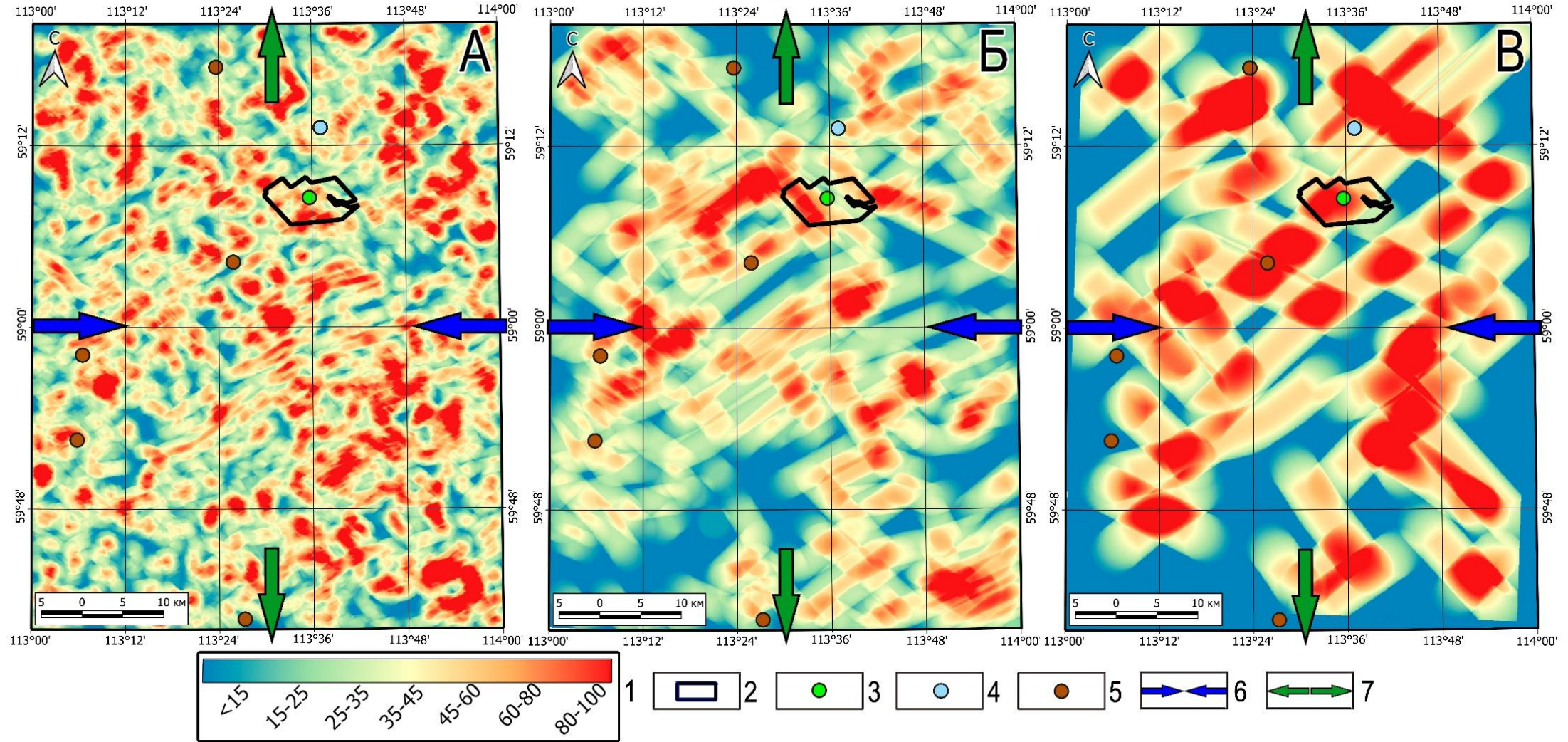
Б – протяженных линейных элементов, выделенных оператором; **В** – закартированные разрывные структуры



1-3 – месторождения (а) и рудопроявления (б): **1** – U, **2** – Sn, **3** – Fe; **4-7** – рудопроявления: **4** – Au, **5** – Cu, **6** – Ti, **7** – W;

8 – сегменты повышенной проницаемости; **9** – проницаемые сегменты; **10** – сегменты средней проницаемости; **11** – слабопроницаемые сегменты; **12** – непроницаемые сегменты; **13** – ориентировка региональной оси максимального сжатия; **14** – ориентировка региональной оси максимального растяжения; **15** – границы перспективного Туюканского участка.

Схемы относительной удельной плотности гидравлически активных сегментов структур различных рангов по результатам расчета тенденции к сдвигу с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций



А – коротких линеаментов, выделенных автоматически; **Б** – линеаментов, выделенных вручную;

В – установленных протяженных разломных зон.

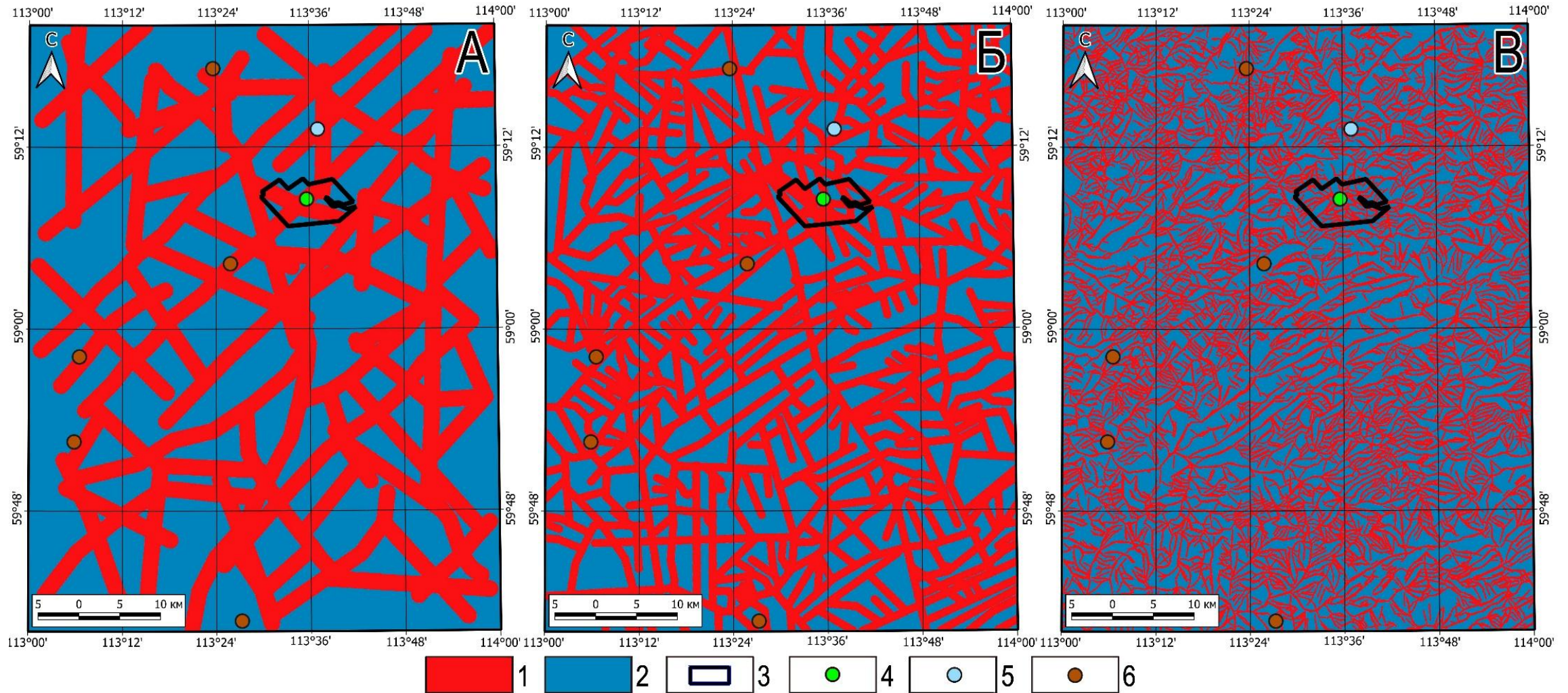
1 – значения в процентах относительной удельной плотности; **2** – перспективный Туюканский участок; **3-5** – месторождения U (3), Sn (4) и Fe (5);

6-7 – ориентировки региональных осей максимального сжатия (6) и растяжения (7).

Схемы визуализации зон динамического влияния установленных и предполагаемых разрывных структур различных рангов

А – выявленных протяженных разломных зон; Б – протяженных линейментов, выделенных вручную;

В – коротких линейментов, выделенных автоматически



1 – области зон динамического влияния разрывных структур; 2 – области вне зон динамического влияния; 3 – перспективный Туюканский участок; 4-6 – месторождения U (4), Sn (5) и Fe (6).

Структуры центрального типа (СЦТ)

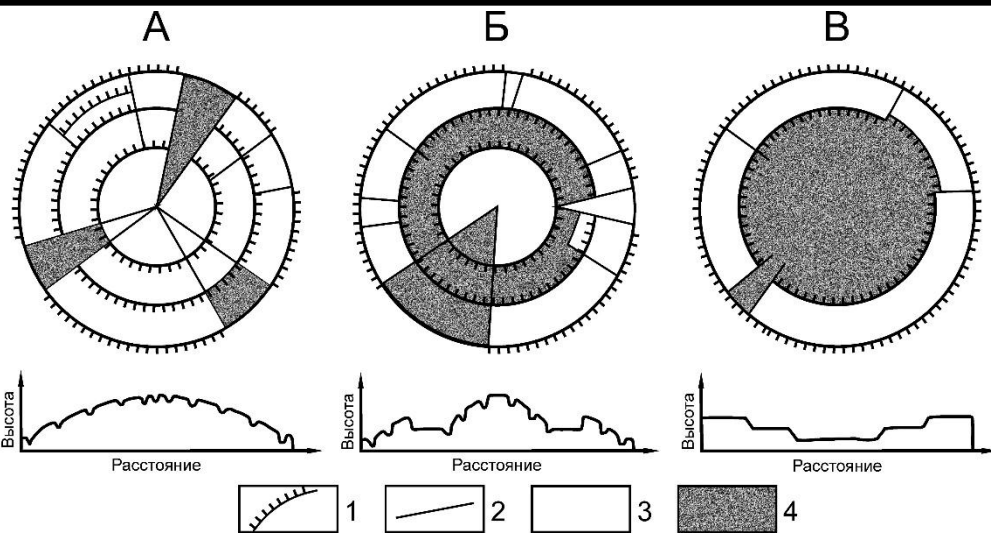
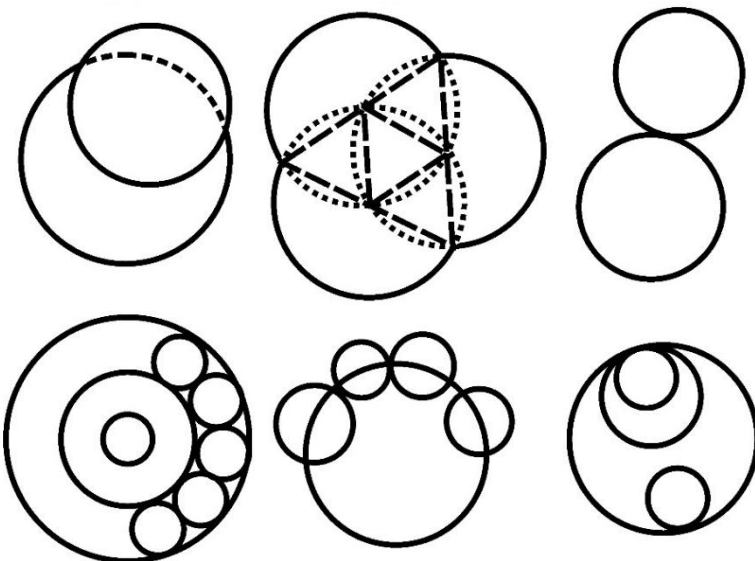


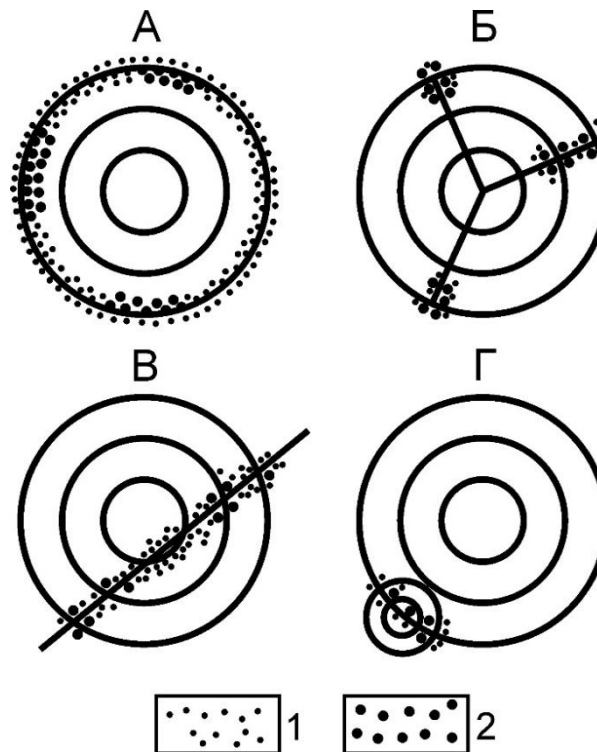
Схема морфологической классификации структур центрального типа на плане (I) и обобщенном профиле (II) (Соловьев, 1978): А – купольные структуры, Б – купольно-кольцевые структуры, В – кольцевые структуры; 1 – кольцевые разломы (сбросы), 2 – радиальные разломы, 3 – относительно поднятые блоки, 4 – относительно опущенные блоки.

Схема пространственных взаимоотношений морфоструктур центрального типа (Гуревич, 2009) с дополнениями авторов



Принципиальная схема локализации полезных ископаемых в пределах СЦТ (Соловьев, 1978):

А – в зоне внешних концентрических блоков, Б – в каркасных узлах, В – в зонах секущих разломов, Г – в участках структурной интерференции; 1 – рудопроявления, 2 – месторождения.



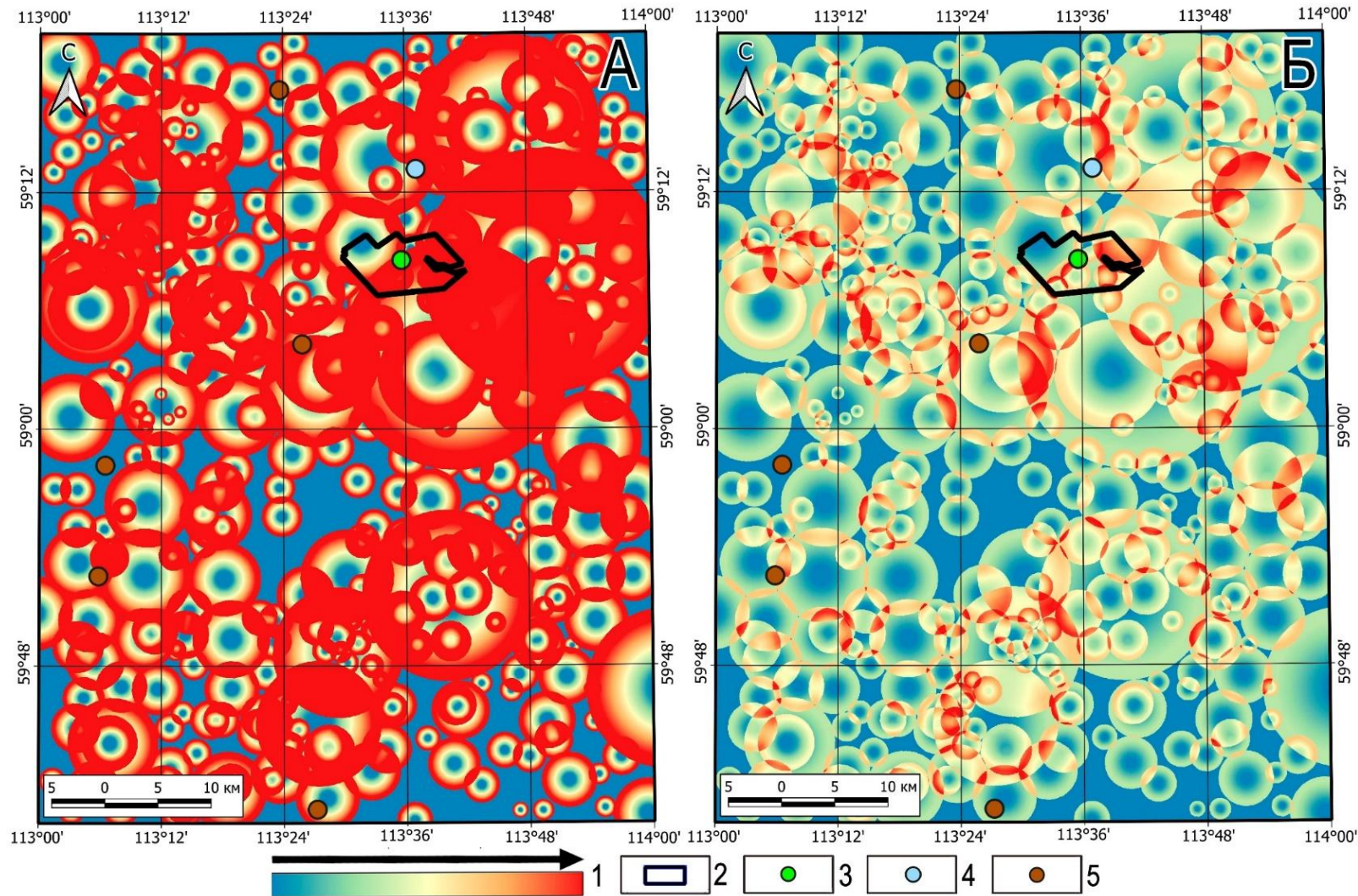
Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Нафигин И.О., Яровая Е.В. Дешифрирование и интерпретация структур центрального типа на территории Юго-Восточного Забайкалья для прогноза рудообразующих систем // Геология рудных месторождений. 2024. Т. 66. № 4. С. 329-362.

Гуревич Д.В. Кольцевые структуры: важнейшие механизмы образования // Региональная геология и металлогения. 2009. № 39. С. 14-23.

Невский В.Д., Фролов Д.Д. Структуры рудных месторождений кольцевого типа. М.: Недра, 1985. 247 с.

Соловьев В.В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-морфологического анализа. Объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1 : 10 000 000. Ленинград: М-во геологии СССР. Всесоюз. ордена Ленина науч.-исслед. геол. ин-т., 1978. 111 с.

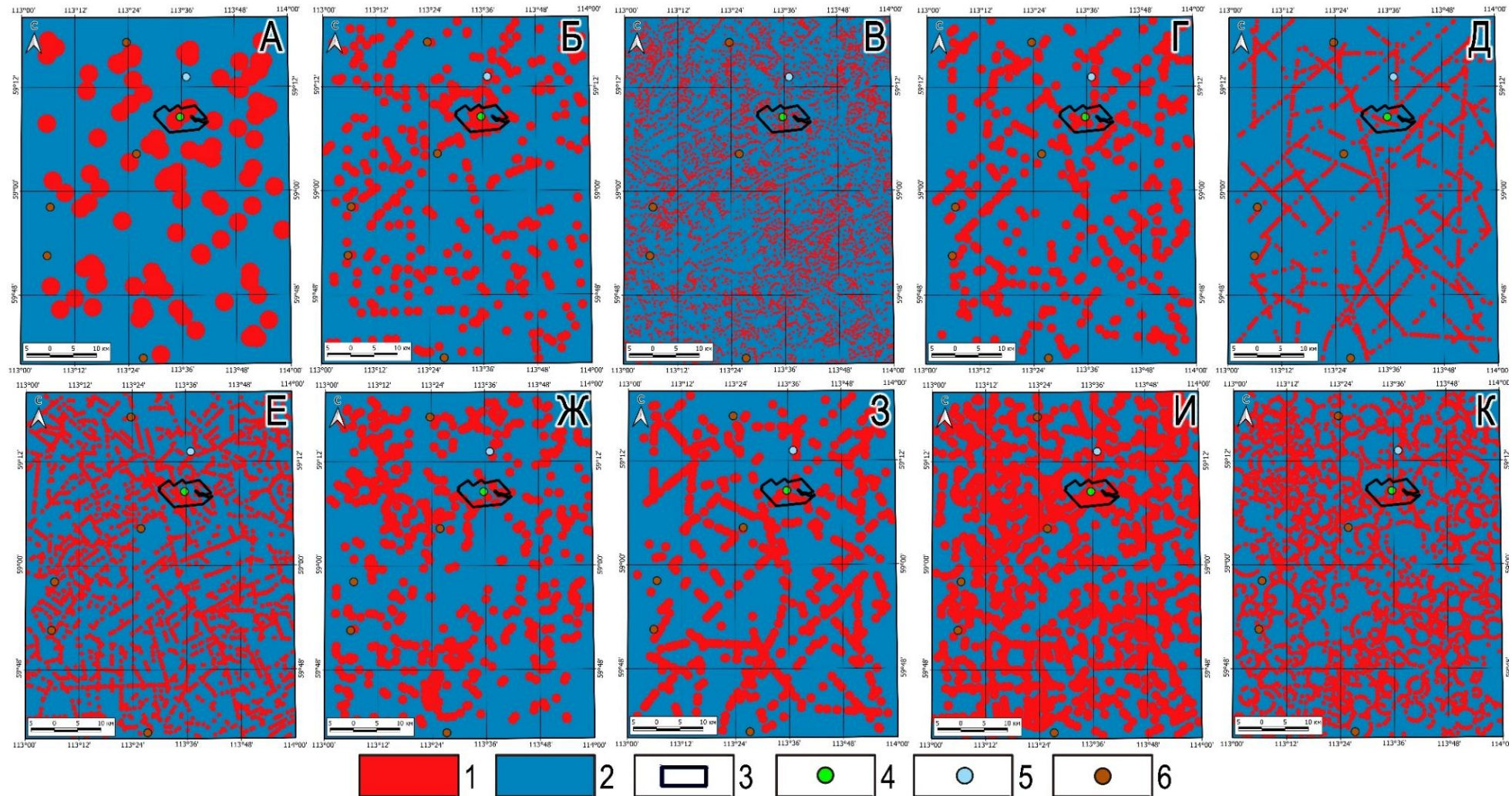
Схемы визуализации наиболее значимых критериев локализации рудной минерализации относительно выделенных структур центрального типа (СЦТ)



А – схема вероятности локализации рудной минерализации от центра СЦТ к периферии с учетом наложений (интерференции) структур; **Б** – интерференция СЦТ с учетом вероятности локализации рудной минерализации.

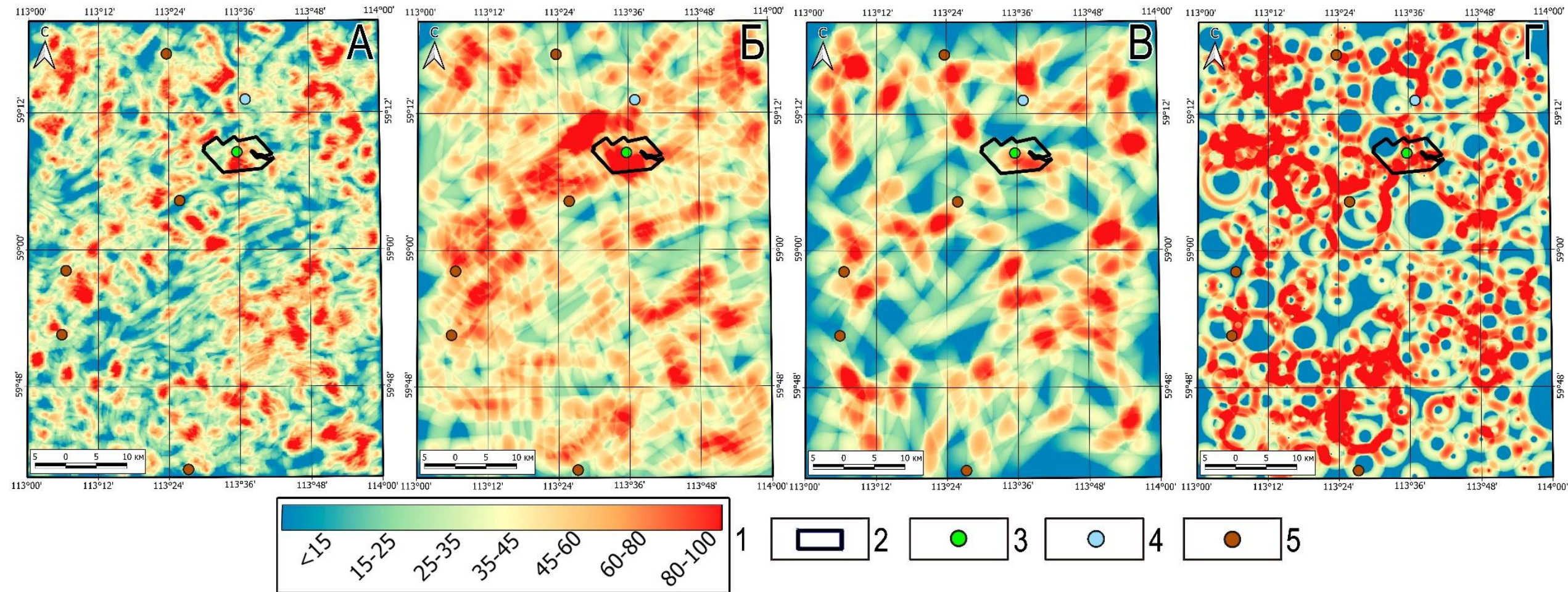
1 – вероятность локализации рудной минерализации (от 0 до 1); **2** – перспективный Туюканский участок; **3-5** – месторождения U (3), Sn (4) и Fe (5).

Схемы визуализации областей предполагаемых структурных узлов, сформированных при пересечении структур различных типов и рангов



А – выявленных протяженных разломных зон; **Б** – протяженных линеаментов, выделенных вручную; **В** – коротких линеаментов, выделенных автоматически; **Г** – протяженных разломных зон и линеаментов, выделенных вручную; **Д** – протяженных разломных зон и линеаментов, выделенных автоматически; **Е** – линеаментов, выделенных вручную, и линеаментов, выделенных автоматически; **Ж** – кольцевых разломов; **З** – кольцевых разломов и протяженных разломных зон; **И** – кольцевых разломов и линеаментов, выделенных вручную; **К** – кольцевых разломов и линеаментов, выделенных автоматически. **1** – области структурных узлов; **2** – ненарушенные области; **3** – перспективный Туюканский участок; **4-6** – месторождения U (4), Sn (5) и Fe (6).

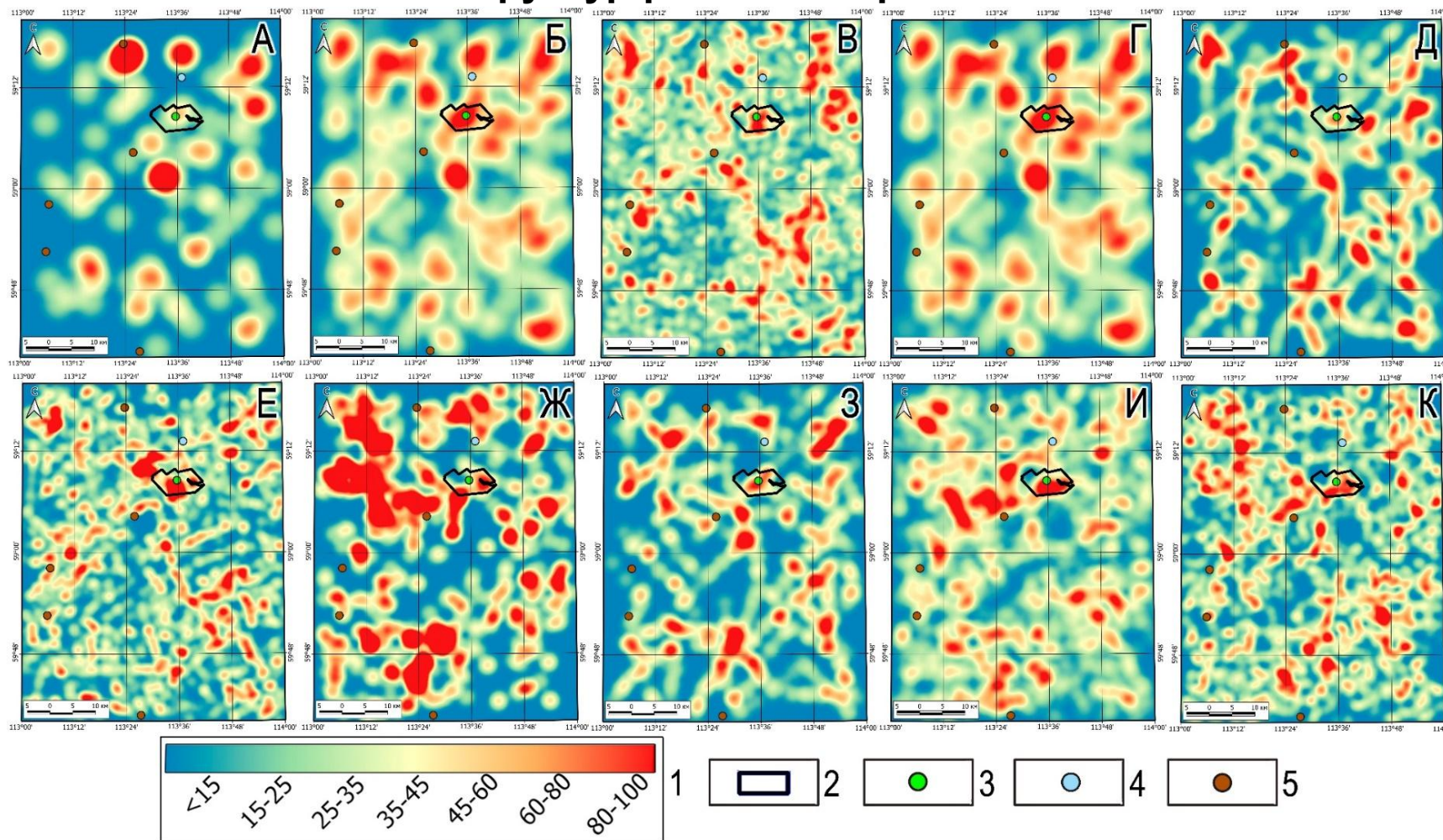
Схемы относительной удельной плотности структур различных типов и рангов



А – коротких линеаментов, выделенных автоматически; **Б** – протяженных линеаментов, выделенных вручную; **В** – выявленных авторами протяженных разломных зон; **Г** – кольцевых разломов.

1 – значения в процентах относительной удельной плотности; **2** – перспективный Туюканский участок; **3-5** – месторождения U (3), Sn (4) и Fe (5).

Схемы относительной удельной плотности структурных узлов, формирующихся на пересечении структур различных рангов



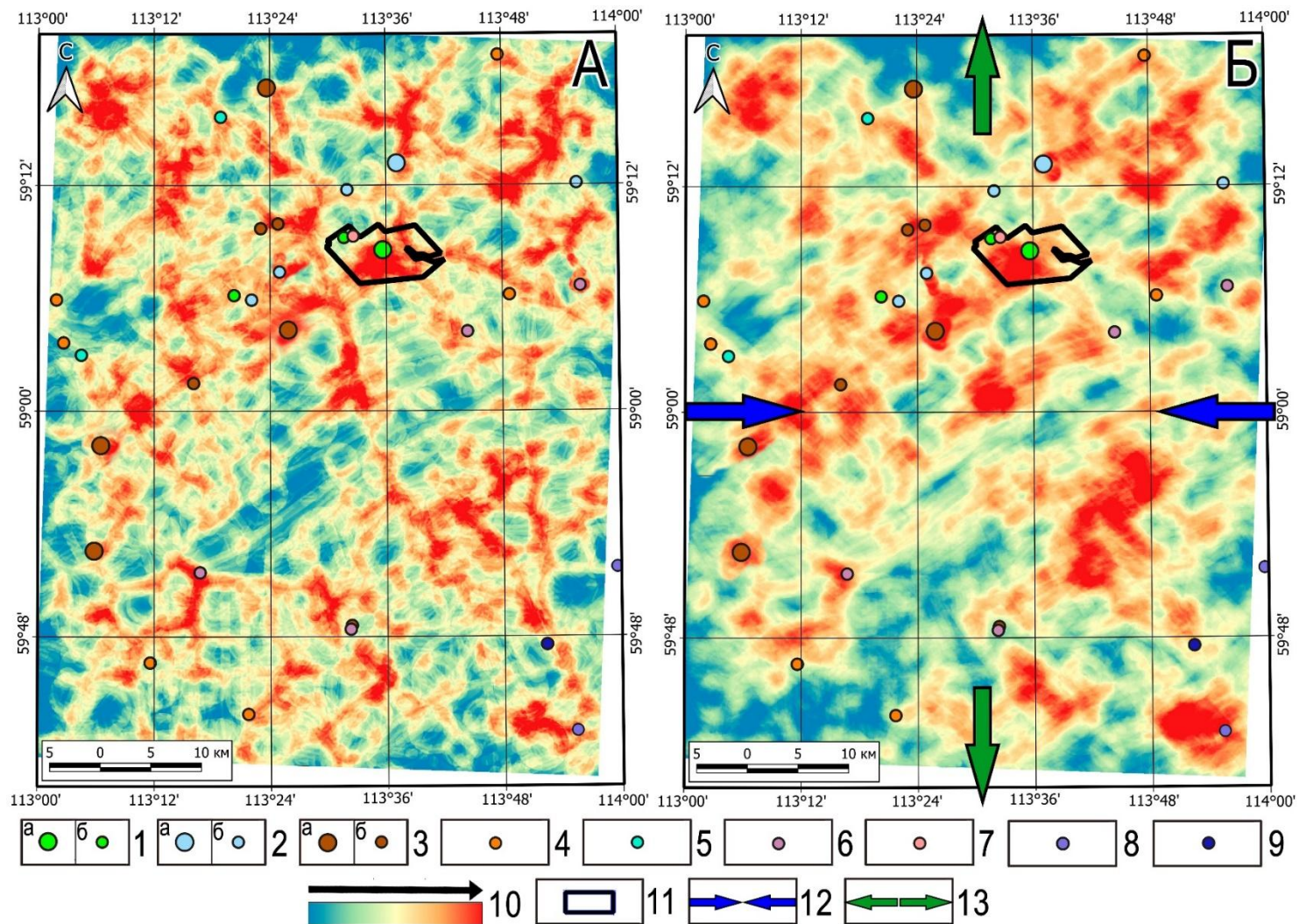
А – выявленных протяженных разломных зон; **Б** – протяженных линейментов, выделенных вручную; **В** – коротких линейментов, выделенных автоматически; **Г** – протяженных разломных зон и линейментов, выделенных вручную; **Д** – протяженных разломных зон и линейментов, выделенных автоматически; **Е** – линейментов, выделенных вручную, и линейментов, выделенных автоматически; **Ж** – кольцевых разломов; **З** – кольцевых разломов и протяженных разломных зон; **И** – кольцевых разломов и линейментов, выделенных вручную; **К** – кольцевых разломов и линейментов, выделенных автоматически.

1 – значения в процентах относительной удельной плотности; **2** – перспективный Туюканский участок; **3-5** – месторождения U (3), Sn (4) и Fe (5) **17**

Структурные региональные пространственные прогнозно-поисковые критерии и коэффициенты их веса для района Туюканского рудного узла

№	Критерий	Коэфф. веса	№	Критерий	Коэфф. веса	№	Критерий	Коэфф. веса	№	Критерий	Коэфф. веса
Зоны динамического влияния линейных структур различных рангов			9.	Структурные узлы, сформированные на пересечении линеаментов, выделенных вручную, и линеаментов, выделенных автоматически	0,96	Относительная удельная пространственная плотность структур различных типов и рангов			26.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении кольцевых разломов и линеаментов, выделенных вручную	1,17
1.	Зоны динамического влияния выявленных протяженных разломных зон	1,2	10.	Структурные узлы, сформированные на пересечении кольцевых разломов	0,64	18.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении выявленных протяженных разломных зон	0,95	27.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении кольцевых разломов и линеаментов, выделенных автоматически	0,69
2.	Зоны динамического влияния протяженных линеаментов, выделенных вручную	1,36	11.	Структурные узлы, сформированные на пересечении кольцевых разломов и протяженных разломных зон	1,25	19.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении протяженных линеаментов, выделенных вручную	1,17	Области вероятной локализации рудной минерализации относительно элементов структур центрального типа		
3.	Зоны динамического влияния коротких линеаментов, выделенных автоматически	1,16	12.	Структурные узлы, сформированные на пересечении кольцевых разломов и линеаментов, выделенных вручную	1,22	20.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении коротких линеаментов, выделенных автоматически	0,96	28.	Максимумы вероятности локализации рудной минерализации от центра СЦТ к периферии структур	1,68
Области структурных узлов, сформированных на пересечении структур различных типов и рангов			13.	Структурные узлы, сформированные на пересечении кольцевых разломов и линеаментов, выделенных автоматически	1,16	21.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении протяженных разломных зон и линеаментов, выделенных вручную	1,26	29.	Максимумы интерференции СЦТ с учетом вероятности локализации рудной минерализации	0,96
4.	Структурные узлы, сформированные на пересечении выявленных протяженных разломных зон	1,05	Относительная удельная пространственная плотность структур различных типов и рангов			22.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении протяженных разломных зон и линеаментов, выделенных автоматически	0,87	Относительная удельная пространственная плотность гидравлически активных сегментов структур различных рангов		
5.	Структурные узлы, сформированные на пересечении протяженных линеаментов, выделенных вручную	1,17	14.	Максимумы относительной удельной плотности линеаментов, выделенных автоматически	1,35	23.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении линеаментов, выделенных вручную, и линеаментов, выделенных автоматически	1,17	30.	Максимумы плотности гидравлически активных сегментов коротких линеаментов, выделенных автоматически	1,65
6.	Структурные узлы, сформированные на пересечении коротких линеаментов, выделенных автоматически	0,78	15.	Максимумы относительной удельной плотности линеаментов, выделенных вручную	1,68	24.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении кольцевых разломов	1,05	31.	Максимумы плотности гидравлически активных сегментов линеаментов, выделенных вручную	1,14
7.	Структурные узлы, сформированные на пересечении протяженных разломных зон и линеаментов, выделенных вручную	0,78	16.	Максимумы относительной удельной плотности выявленных авторами протяженных разломных зон	1,45	25.	Максимумы плотности структурных узлов на пересечении кольцевых разломов и протяженных разломных зон	0,57	32.	Максимумы плотности гидравлически активных сегментов установленных протяженных разломных зон	2,04
8.	Структурные узлы, сформированные на пересечении протяженных разломных зон и линеаментов, выделенных автоматически	0,69	17.	Максимумы относительной удельной плотности кольцевых разломов СЦТ	1,3						

Весовые структурные прогнозно-поисковые модели района Туюканского рудного узла

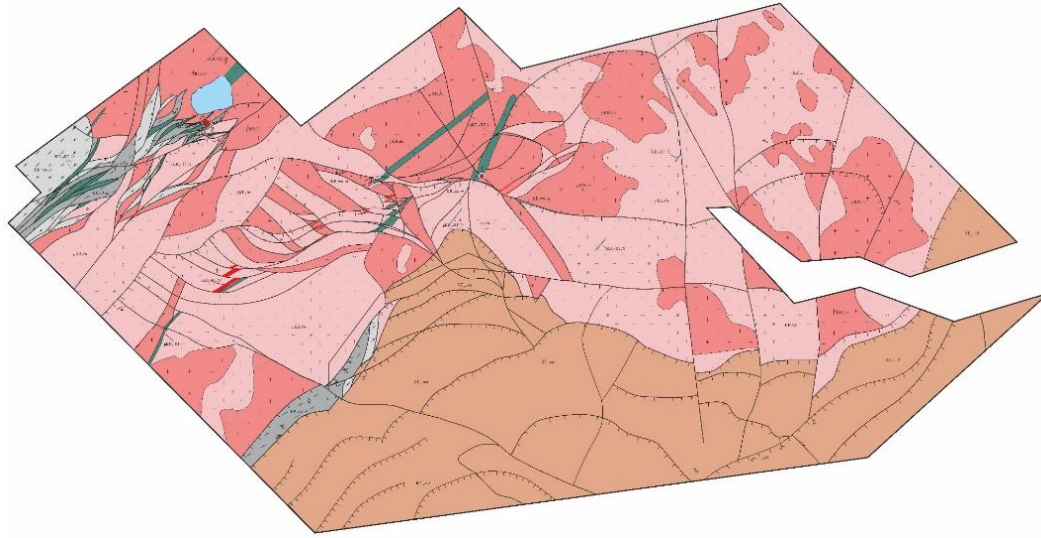


А – на основе всех выявленных критериев и их установленных коэффициентов веса; **Б** – на основе всех выявленных критериев с преобладанием тектонофизических критериев, отражающих параметры регионального поля напряжений-деформаций на предполагаемый период отложения первичных урановых руд.

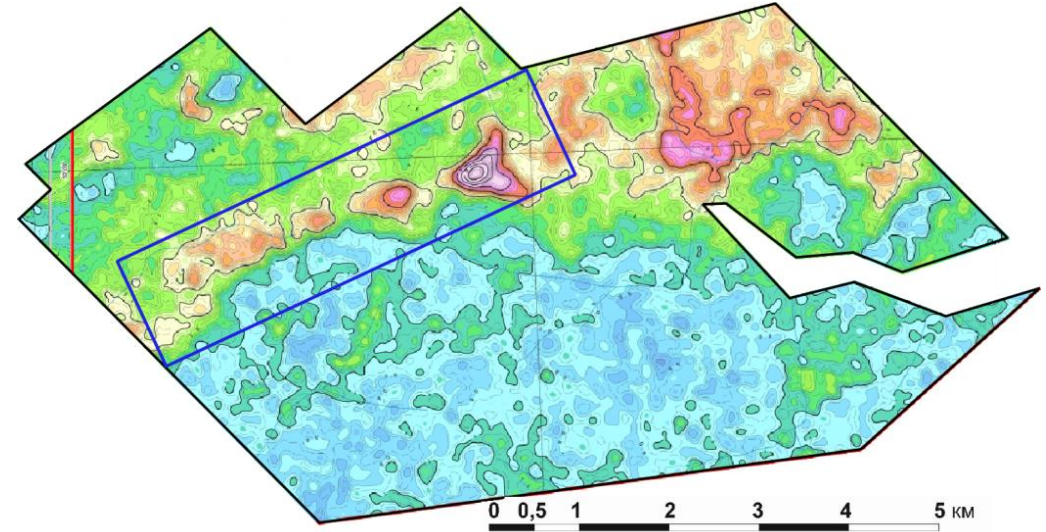
1-3 – месторождения (а) и рудопроявления (б): **1** – U, **2** – Sn, **3** – Fe; **4-9** – рудопроявления: **4** – Au, **5** – Cu, **6** – Ti, **7** – W; **8** – Li, **9** – Ta и Nb; **10** – вероятность локализации рудного вещества; **11** – перспективный Туюканский участок; **12-13** – ориентировки региональных осей максимального сжатия (12) и растяжения (13).

Выбор участка детализации в пределах перспективного участка Туяукан

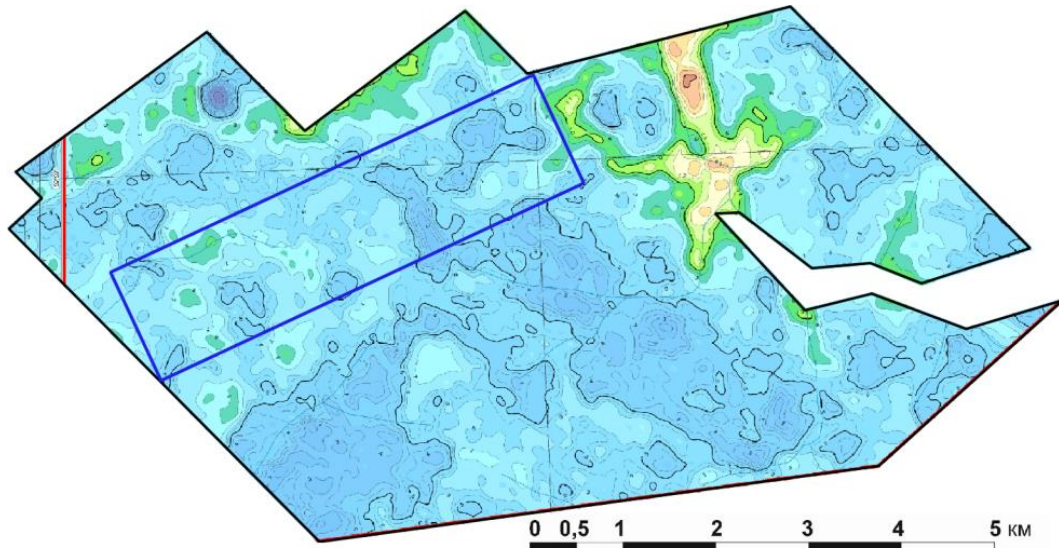
Геологическая карта участка



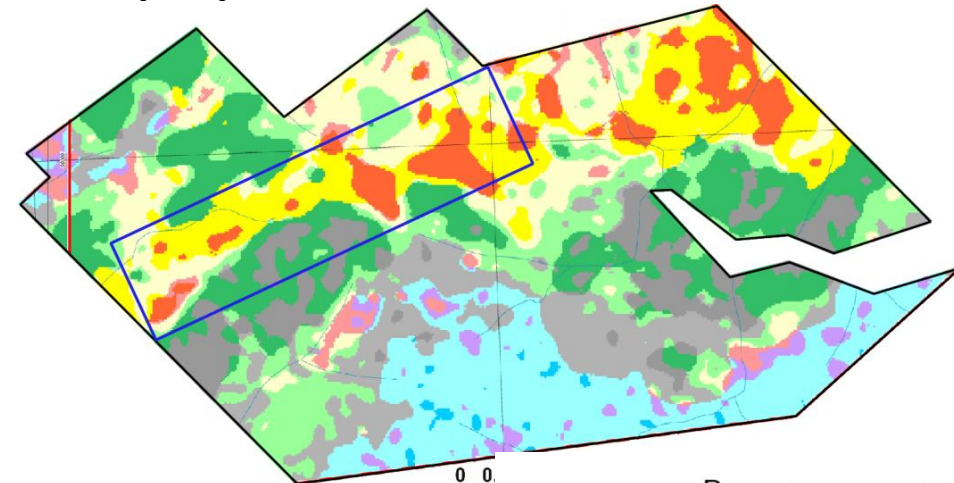
Карта АГСМ съемки (уран)



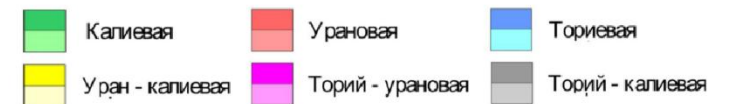
Карта АГСМ съёмки (торий)



Карта радиогеохимической зональности



Радиогеохимические зоны



Создание локальной прогнозно-поисковой модели перспективного участка Туюкан

А – максимумы локальных аэрогамма-спектрометрических аномалий (красный);

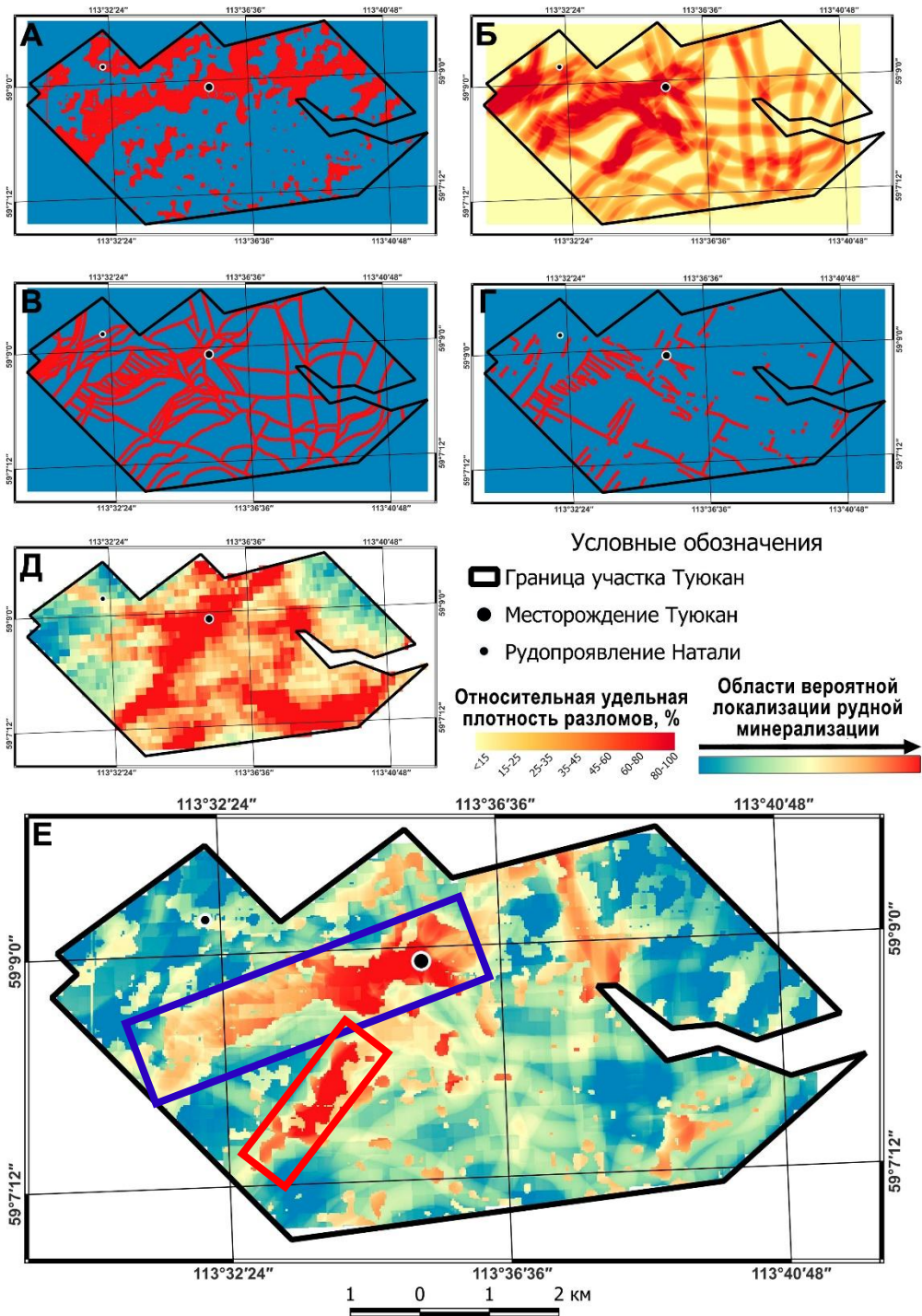
Б – максимумы относительной удельной плотности линейных разломов;

В – области зон динамического влияния линейных разломов (красный);

Г – области зон динамического влияния линейных разломов со значениями коэффициента тенденции к сдвигу около 0,6 (красный);

Д – региональная структурная прогнозно-поисковая модель района Туюканского рудного узла;

Е – локальная прогнозно-поисковая модель участка Туюкан.



Спасибо за внимание!

Контакты:



Степан Устинов:
stevesa@mail.ru

