

УДК 550.4:55

Силин И.И., Килипко В.А. (ФГБУ «ИМГРЭ»),
Межеловский Н.В., Межеловский И.Н. (МЦГК
«Геокарт»)

**ПРОГНОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ
ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ АНОМАЛЬНОГО ГЕОХИМИ-
ЧЕСКОГО ПОЛЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЗЕМНОЙ
КОРЫ**

*Описывается теоретическое обоснование и технология прогнозирования минеральных ресурсов с использованием численной ранговой модели аномального геохимического поля континентальной земной коры. Модель составлена для наиболее распространенных химических элементов (кроме петрогенных). **Ключевые слова:** численная модель, ранг аномального поля, аномальное содержание элемента, прогноз, ряд Фибоначчи.*

Silin I.I., Kilipko V.A. (IMGRE), Mezhelovskiy N.V., Mezhelovskiy I.N. (Geokart)

**FORECAST OF MINERAL RESOURCES ON THE BASIS
OF NUMERICAL MODELS OF ANOMALOUS
GEOCHEMICAL FIELDS OF THE CONTINENTAL
CRUST**

*Theoretical justification and technology of forecasting of mineral resources with use of numerical rank model of the abnormal geochemical field of continental crust (AGHP) is described. The model is made for most widespread chemical elements (except petrogenic). **Keywords:** numerical model, grade abnormal fields, abnormal contents of the element, forecast. Fibonacci's number.*

Введение

По современным представлениям вещество Вселенной и Земли распределено неравномерно, а его пространственная структура хорошо описывается фрактальной моделью. Сущность геохимической фрактальной модели заключается в сочетании самоподобных аномальных геохимических полей (АГХП) разного масштаба, составляющих общий узор планетарного геохимического поля, что можно наблюдать на примере планетарного, глобальных и локальных полей.

Для прогноза минеральных ресурсов АГХП в прикладной геохимии используются стохастическая и детерминированная математические модели, а также метод аналогии с известными рудоносными территориями. Поскольку съемочные работы стали основным источником перспективных площадей, необходимо оценить прогностические возможности ГХО-1000 и ГХО-200. Широко распространенная детерминиро-

ванная модель хорошо зарекомендовала себя вблизи месторождений, где причинно-следственная связь рудоконтролирующих факторов и прогнозных ресурсов наиболее очевидна. При мелкомасштабных геохимических съемках пространственная связь между смежными точками пробоотбора становится неочевидной (при ГХО-1000 плотность опробования составляет 1 проба на 100 км²), а возможность применения стохастической модели ограничивается малым числом проб. Так, при минимальной выборке 30 проб ГХО-1000 позволяет статистически выделить аномальный рудный район (РР) площадью 3000 км², а при ГХК-200 (1 проба на 4 км²) — рудный узел (РУ) площадью 120 км². Обосновать проведение поисковых работ на локальных геохимических аномалиях, выделенных в пределах РР и РУ, охарактеризованных двумя-тремя пробами с высоким содержанием рудного элемента за бюджетные средства, а тем более заинтересовать инвесторов, крайне сложно и ненадежно, что подтверждается низкой эффективностью поисковых работ. Очевидно, что математическая обработка аналитических результатов региональных и среднемасштабных геохимических съемок для прогнозирования ресурсов требует повышения плотности опробования и привлечения количественных показателей из смежных геологических дисциплин.

Обоснование модели

Согласно уравнения Л. Больцмана, энтропия (S) любого процесса определяется логарифмом его вероятности (W): $S = k \ln W$, где k — постоянная Больцмана, равная $1,38E^{-16}$ эрг. Град·моль. Используя свойства энтропии термодинамического процесса рудообразования, Н.И. Сафронов определил затраты энергии ($E_{ист}$), необходимой для образования единицы объема руды заданного кларка концентрации (K) одного элемента: $E_{ист} = K \ln K$. Этот обычно многоступенчатый процесс перехода элементов из состояния рассеяния в состояние концентрирования требует определенных затрат энергии (E) прямо пропорциональной рудной массе (τ) и концентрации в ней полезного компонента (C) и обратно пропорциональной кларку этого компонента в земной коре (κ): $E = f(m, C, 1/\kappa)$ [6].

В геостатистике Ж. Матерона [3], характеризующей пространственное распределение рудного вещества, содержание элементов в выборке геохимических проб представлено сочетанием двух составляющих — регулярной и случайной: $y(x) = F(C, x) + f(x)$. В отечественной прикладной геохимии распределение содержания элемента в геохимической аномалии чаще всего описывается формулой: $C_x = C_\phi + C_{max} \cdot e^{-\lambda x}$. В этом выражении, согласно модели Матерона, C_ϕ является регулярной составляющей, не представляющей поискового интереса, а случайная составляющая $C_{max} \cdot e^{-\lambda x}$ является показательной функцией, описывающей

условия накопления рудного вещества. В этой функции: x — расстояние от центра максимального накопления (C_{\max}), которое удобно использовать, если площадь АГХП принять за единицу, состоящую из x участков, каждый из которых представляет собой блок (объем) земной коры, характеризуемый геохимическими пробами с одинаковым содержанием элемента, например, $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ и т.д.; λ — показатель экспоненты, характеризующий суммарные свойства среды, свойства элемента, тип накопления и пр. Его величина определяется через условия нормирования: $C_a = C_{\max} \cdot e^{-\lambda x} / \bar{C} = \bar{C} + t\bar{C} = 1 + t\bar{C}$, где v — величина вариации содержаний элемента в выборке, t — критерий Стьюдента. Так как на границе аномалии нормированная площадь равна единице ($x=1$), то и нормированное $C_a = 1$, т.к. ($C_a = \bar{C}$), то $f(x) = C_{\max} e^{-\lambda x} = 1$, $\text{Ln} C_a^{-\lambda x} = \text{Ln} 1$, $\lambda = \text{Ln} C_a$. Аналогично для центра аномалии ($x=0$): $e^{-\lambda x} = e^0 = 1$, $f(x) = C_a$. В общем виде ($0 < x < 1$) функция распределения случайной составляющей в АГХП имеет вид:

$$f(x) = C_a e^{-\text{Ln} C_a x} \quad (1)$$

В логарифмическом виде $f(\ln(x=1)) = -C_a \cdot \text{Ln} C_a$ модуль функции подобен формуле Н.И. Сафронова, что является следствием энергетической обусловленности рудообразования на молекулярном (минеральном) уровне.

Так как, согласно первому закону термодинамики, разные виды энергии переходят друг в друга в строго эквивалентных количествах, то подобие функционалов $K \text{Ln} K \equiv C_a \text{Ln} C_a$ на макроуровне достигается также и за счет агрегатного, текстурно-структурного и морфологического состояния рудных скоплений. Распределение рудного вещества в региональных АГХП описывается степенной функцией, осредняющей параметры локальных скоплений рудного вещества, каждое из которых описывается функцией (1), что будет показано далее.

Для прикладной геохимии важнейшим выводом из подобия АГХП разного ранга является то, что при одинаковой энергии рудообразования объем пространственных скоплений рудного вещества уменьшается пропорционально росту концентрации рудных элементов. При разведке месторождений это учитывается оценкой доли запасов промышленной руды в объеме месторождения с помощью коэффициента рудоносности. При оценке прогнозных ресурсов АГХП также вводятся дополнительные количественные параметры, позволяющие определить долю рудного вещества в объеме аномального блока земной коры — коэффициенты промышленной концентрации (K_{cp}) и промышленной рудоносности (K_{sp}) [9]. Вычисление этих коэффициентов производится с учетом

Таблица 1
Золотая пропорция рудоносных площадей (ряд Фибоначчи)

Ранг аномального геохимического поля (АГХП)	Площадь АГХП	Ряд Фибоначчи
ЗК — земная кора континентов	1000000000	89
МГП — пояс, мегапровинции	100000000	55
МО — провинция, область	10000000	34
МГЗ — субпровинция, мегазона	1000000	21
МЗ — минерагеническая зона	100000	13
РР — рудный район	10000	8
РУ — рудный узел	1000	5
РП — рудное поле	100	3
РМ — рудное месторождение	10	2
РТ — рудное тело	1	1

ранговой структуры АГХП, иначе они теряют смысл количественных параметров, что видно из приводимого ниже описания численной геохимической модели континентальной земной коры.

Построение модели

Для построения математической модели нужны два множества: множество наблюдаемых величин и моделирующее множество, состоящее из математических понятий. Математическое моделирование — это отображение первого множества во второе. Численная геохимическая модель верхней части континентальной земной коры (далее модель) состоит исключительно из чисел, характеризующих распределение содержания элементов и их соотношения в АГХП любого ранга. Для ее построения использован трансдисциплинарный подход, при котором естественные элементы геологической среды могут существовать в виде взаимосвязанных ансамблей с цифровыми характеристиками пространственного распределения химических элементов. В данном случае в общей функциональной модели земной коры использованы количественные параметры геотектоники, металлогении и

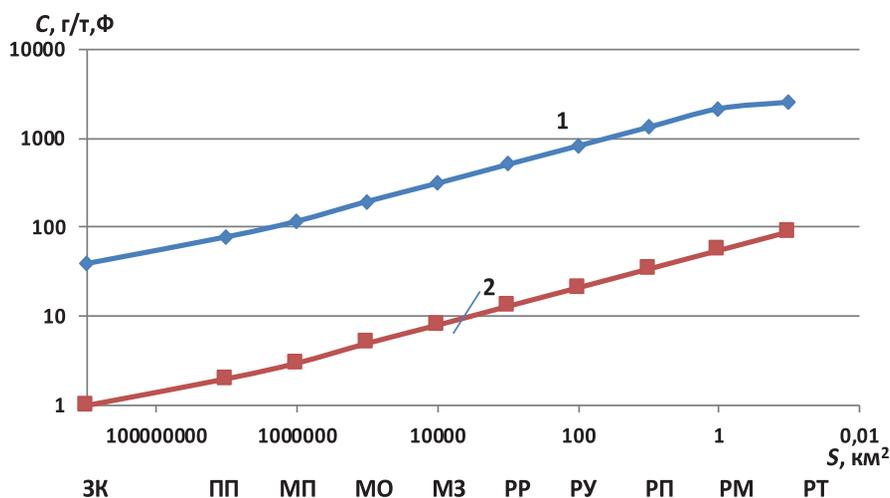


Рис. 1. Диаграмма сравнения распределения содержания меди (1) и ряда Фибоначчи (2) в рудоносных структурах земной коры

геохимии. В обоснование моделирующего множества положена установленная функциональная взаимосвязь размеров рудоносных площадей иерархического ряда Рундквиста-Овчинникова [6], табл. 1 и аналогичная этому ряду иерархия АГХП [11], дополнительно

уточненная тектоническим [10] и металлогеническим [5] кодексами, с кларками верхней части земной коры [1] и численным рядом Фибоначчи (Φ).

Согласно известному алгебраическому ряду Фибоначчи, каждый член ряда равен сумме двух предыдущих, т.е. последовательно возрастает на множитель 1.618 и убывает в обратном направлении на 0.618 (1/1,618). Основное свойство ряда Фибоначчи, так называемое «золотая пропорция» состоит в том, что отношение любого большего числа ряда к меньшему равно отношению суммы этих чисел к большему числу. В табл. 1 приведены минимальные размеры иерархического ряда рудоносных структур (АГХП), начиная от континентальной земной коры до месторождения, содержание меди от кларка до минимально-промышленного содержания и ряд чисел Фибоначчи. На диаграмме, построенной по данным таблицы, видно, что содержание меди и числа Φ последовательно возрастают от кларка верхней части земной коры до минимального промышленного содержания в месторождении и рудном теле (рис. 1). Если ранговую концентрацию элемента выразить в кларках концентрации (K_k), то полученный ряд численно совпадает с рядом Фибоначчи (табл. 2). Нижние два ряда чисел таблицы характеризуют расчетные значения ранговых коэффициентов промышленной концентрации, равного отношению содержания элемента в ранге к его содержанию в РТ (K_{Cp}) и промышленной рудоносности, определяемого как отношение площади минимального РМ к площади АГХП соответствующего ранга (K_{Sp}).

Расчетные значения K_{Cp} , приведенные в табл. 2, отличаются от эмпирических [9, 10], так как, например, в составе петрогенных элементов (Fe, Ti) только часть минералов является рудными, а многие редкие элементы, кларк которых менее 1 г/т, добываются попутно из рудных концентратов других металлов. По этой причине для оценки ресурсов локальных аномалий ранга РМ следует использовать реальные минимально-промышленные содержания элементов [9]. Числа каждого ряда табл. 2 характеризуют границу рангов: они являются максимальными для текущего и минимальными для следующего за ним ранга. Это обусловлено тем обстоятельством, что в принятых для модели классификациях размеры металлогенических структур и АГХП в составе каждого подразделения (ранга) варьируют в пределах одного порядка. Планетарная численная геохимическая модель в развернутом виде приведена в табл. 3. Каждая ячейка таблицы модели

Таблица 2
Ранговые коэффициенты АГХП континентальной земной коры

АГХП	ЗК	МГП	МО	МГЗ	МЗ	РР	РУ	РП	РМ	РТ
$S, \text{ км}^2$	1E+9	1E+7	1E+6	1E+5	1E+4	1000	100	10	1	0.1
Φ	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89
K_k	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89
K_{Cp}	0.01	0.02	0.03	0.056	0.09	0.14	0.23	0.38	0.618	1
K_{Sp}	1E-9	1E-7	1E-6	1E-5	1E-4	0.001	0.01	0.1	α	1

обладает свойством золотой пропорции: отношение максимального содержания элемента к минимальному равно отношению суммы содержаний к максимальному. Сумма содержаний в текущем ранге равна максимальному содержанию элемента в следующем ранге, что является основой применимости детерминированной модели для вычисления прогнозных ресурсов.

В математике связь ряда значений, подчиняющихся распределению Фибоначчи, описывается формулой Бине: $F_n = \varphi^n / \sqrt{5}$, n — порядковый номер ранга, $\varphi = 1,618$. Для того, чтобы определить расчетное содержание элемента в определенном ранге модели (C_n) достаточно умножить кларк элемента (K) на F_n , округленные до целого значения которого равны числам Фибоначчи:

$$C_n = K * \varphi^n / \sqrt{5} \quad (2).$$

Например, для Cu (табл. 1):

$$Cu_{МП(F_2)} = K \varphi^2 / \sqrt{5} = 39 \cdot 1.618^2 / 2.24 = 39 \cdot 1.2 \approx 39 \cdot 1;$$

$$Cu_{МП(F_3)} = 39 \cdot 1.618^3 / 2.24 = 39 \cdot 1.9 \approx 39 \cdot 2 = 78; \dots$$

$$C_{РТ(F_{10})} = 39 \cdot 1.618^{10} / 2.24 = 39 \cdot 54.9 \approx 39 \cdot 55 = 2145.$$

Расчетное содержание элемента в локальной аномалии, вычисленное по формуле (1), с учетом качества национальных анализов должно соответствовать величине, вычисленной по формуле (2), а также табличному значению модели. Это является контрольным условием корректности вычисления прогнозных ресурсов высоких категорий.

Каждый ранг АГХП в численной модели охарактеризован пятью параметрами, необходимыми для количественной оценки прогнозных ресурсов промышленных руд по геохимическим данным: диапазоном площадей ранга (S), кларком концентрации элемента, диапазоном метрического содержания элементов в пределах ранга (C_n), расчетным коэффициентом промышленной концентрации (K_{Cp}), расчетным коэффициентом промышленной рудоносности (K_{Sp}).

Объективность модели подтверждается результатами геохимических съемок разного масштаба. Так, эмпирические данные, полученные при составлении карты аномальных геохимических полей территории России м-ба 1:2 500 000, свидетельствуют о хорошей корреляции площадей АГХП и тектонических структур (рис. 2) [2].

Реальное распределение содержания элементов по рангам АГХП оценено по результатам геохимического опробования крупных блоков земной коры, например, на площади листов ГХО-1000 О-49, О-50, как

Таблица 3

Планетарная численная геохимическая модель верхней части континентальной земной коры

АГХП	Континентальная КК	Планетарный металлогенический пояс, ПМП	Металлогенический пояс, МП	Металлогеническая область, МО	Металлогеническая зона, МЗ	Рудный район, РР	Рудный узел, РУ	Рудное поле, РП	Рудное месторождение, РМ	Рудное тело, РТ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
S, км ²	1E+09	1E+07	1E+6-1E+5	1E+5-1E+4	1E+4-1E+3	1E+4-1E+3	1E+3-1E+2	1E+2-1E+1	1E+1-1E0	1E0-1E-1	
Ряд Фибоначчи	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89	
Элемент	К г/т	Содержание элементов в рудоносных площадях соответствующих рангов, г/т									
Li	30	30	60	60-90	90-150	150-240	240-390	390-630	630-1020	1020-1650	1650-2670
Be	2.1	2.1	4.2	4.2-6.3	6.3-10.5	10.5-16.8	16.8-27.3	27.3-44.1	44.1-71.4	71.4-115.5	115.5-186,3
B	34	34	68	68-102	102-170	170-272	272-442	442-714	714-1156	1156-1870	1870-3025
P	610	610	1220	1220-1830	1830-3050	3050-4880	4880-7930	7930-12810	12810-20740	20740-33510	33510-54290
Sc	15	15	30	30-45	45-75	75-120	120-195	135-315	315-510	510-825	825-1335
Ti	3410	3410	6820	6820-10230	10230-17050	17050-27280	27280-44330	44330-71610	71610-115940	115940-187550	187550-303490
V	120	120	240	240-360	360-600	600-960	960-1560	1560-2520	2520-4080	4080-6600	6600-10680
Cr	150	150	300	300-450	450-750	750-1200	1200-1950	1950-3150	3150-5100	5100-8250	8250-13350
Mn	670	670	1340	1340-2010	2100-3350	3350-5360	5360-8710	8710-14070	14070-22780	22780-36850	36850-59630
Fe*	4060	4060	8120	8120-12180	12180-20300	20300-32480	32480-52780	52780-85260	85260-138040	138040-223300	223300-361340
Co	17	17	34	34-51	51-85	85-136	136-221	221-357	357-578	578-935	935-1513
Ni	62	62	124	124-186	186-310	310-496	496-806	806-1302	1302-2108	2108-3410	3410-5513
Cu	39	39	78	78-117	117-195	195-312	312-507	507-819	819-1326	1326-2145	2145-3471
Zn	78	78	156	156-234	234-390	390-624	624-1014	1638-1638	1638-2652	2652-4290	4290-6942
Ga	19	19	38	38-57	57-95	95-152	152-247	247-399	399-646	646-1045	1045-1691
Ge	1.3	1.3	2.6	2.6-3.9	3.9-6.5	6.5-10.4	10.4-16.9	16.9-27.3	27.3-44.2	44.2-71.5	71.5-116
As	6.5	6.5	13	13-19.5	19.5-32.5	32.5-52	52-84.5	84.5-136.5	136.5-221	221-357.5	357.5-579
Se	0.2	0.2	0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-1.6	1.6-2.6	2.6-4.2	4.2-6.8	6.8-11	11-17,8
Rb	110	110	220	220-330	330-550	550-880	880-1430	1430-2310	2310-3740	3740-6050	6050-9790
Sr	270	270	540	540-810	810-1350	1350-2160	2160-3510	3510-5670	5670-9180	9180-14850	14850-24030
Y	26	26	52	52-78	78-130	130-208	208-338	338-546	546-884	884-1430	1430-2314
Zr	160	160	320	320-480	480-800	800-1280	1280-2080	2080-3360	3360-5440	5440-8800	8800-14240
Nb	12	12	24	24-36	36-60	60-96	96-156	156-252	252-408	408-660	660-1063
Mo	1.5	1.5	3	3-4.5	4.5-7.5	7.5-12	12-19.5	19.5-31.5	31.5-51	51-82.5	82.5-134
Ag	0.13	0.13	0.26	0.26-0.39	0.39-0.65	0.65-1.04	1.04-1.69	1.69-2.73	2.73-4.42	4.42-7.15	7,15-12
Cd	0.3	0.3	0.6	0.6-0.9	0.9-1.5	1.5-2.4	2.4-3.9	3.9-6.3	6.3-10.2	10.2-16.5	16,5-27
In	0.19	0.19	0.38	0.38-0.57	0.57-0.95	0.95-1.52	1.52-2.47	2.47-3.99	3.99-6.46	6.46-10.45	10,45-17
Sn	3.8	3.8	7.6	7.6-11.4	11.4-19	19-30.4	30.4-49.4	49.4-79.8	79.8-129.2	129.2-209	209-338
Sb	1.2	1.2	2.4	2.4-3.6	3.6-6	6-9.6	9.6-15.6	15.6-25.2	25.2-40.8	40.8-66	66-106
Te	0.3	0.3	0.6	0.6-0.9	0.9-1.5	1.5-2.4	2.4-3.9	3.9-6.3	6.3-10.2	10.2-16.5	16,5-27
Cs	4	4	8	8-12	12-20	20-32	32-52	52-84	84-136	136-220	220-355
Ba	510	510	1020	510-1530	1530-2550	2550-4080	4080-6630	6630-10710	10710-17340	17340-28050	28050-45390
La	32	32	64	64-96	96-160	160-256	256-416	416-672	672-1088	1088-1760	1760-2848
Ce	63	63	126	126-189	189-315	315-504	504-819	819-1323	1323-2142	2142-3465	3465-5607
Tu	0.49	0.49	0.98	0.98-1.47	1.47-2.45	2.45-3.92	3.92-6.37	6.37-10.29	10.29-16.66	16.66-26.95	26,95-44
Yb	2.5	2.5	5	5-7.5	7.5-12.5	12.5-20	20-32.5	32.5-52.5	52.4-85	85-137.5	137,5-222
Hf	4.5	4.5	9	9-13.5	13.5-22.5	22.5-36	36-58.5	58.5-94.5	94.5-153	153-247.5	247,5-400
Ta	1.4	1.4	2.8	2.8-4.2	4.2-7	7-11.2	11.2-18.2	18.2-29.4	29.4-47.6	47.6-77	77-125
W	2.5	2.5	5	5-7.5	7.5-12.5	12.5-20	20-32.5	52.5	52.5-85	85-137.5	137,5-223
Pt	0.007	0.007	0.014	0.014-0.021	0.021-0.035	0.035-0.056	0.056-0.091	0.091-0.147	0.0147-0.238	0.238-0.385	0,385-0,6

Окончание табл. 3

Au	0.0065	0.0065	0.013	0.013–0.0195	0.0195–0.0325	0.0325–0.052	0.052–0.085	0.085–0.14	0.14–0.22	0.22–0.36	0,36–0,58
Hg	0.07	0.07	0.14	0.14–0.21	0.21–0.35	0.35–0.56	0.56–0.91	0.91–1.47	1.47–2.38	2.38–3.85	3,85–6,2
Tl	0.77	0.77	1.54	1.54–2.31	2.31–3.85	3.85–6.16	6.18–10.01	10.01–16.17	16.17–26.18	26.18–42.35	42,36–68,6
Pb	17	17	34	34–51	51–85	85–136	136–221	221–357	357–578	578–935	935–1513
Bi	0.33	0.33	0.66	0.66–0.99	0.99–1.65	1.65–2.64	2.64–4.29	4.29–6.93	6.93–11.22	11.22–18.15	18,15–29,4
Th	9.3	9.3	18.6	18.6–27.9	27.9–46.5	46.5–74.4	74.4–120.9	120.9–195.3	195.3–316.2	316.2–511.5	511,5–828
U	2.5	2.5	5	5–7.5	7.5–12.5	12.5–20	20–32.5	32.5–52.5	52.5–85	85–137.5	137,5–223
K _{op}		0.01	0.02	0.03	0.056	0.09	0.14	0.23	0.38	0.618	1
K _{sp}		1E-09	1E-07	1E-06	1E-05	1E-04	0.001	0.01	0.1	α	1

*Вместо кларка приведена оценка доли рудных минералов в составе кларка

это показано на рис. 3, опубликованном еще в 2009 г. [7]. На кинетической диаграмме рис. 3 (врезка) пунктирными линиями показано структурирование АГХП

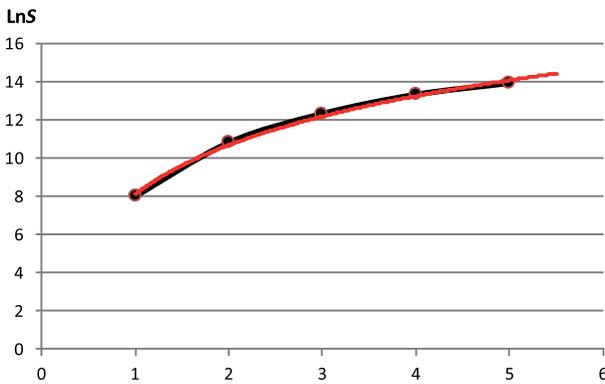


Рис. 2. Тренд фрактальной размерности неоднородностей аномального геохимического поля территории России [2]. Оси: Y- натуральный логарифм площади, X — объекты (1 — РР, 2 — РЗ, 3 — МЗ, 4 — МО, 5 — МП, 6 — МГП). Линия с точками — имперический ряд, гладкая — расчетный

по рангам. Содержание Ag в пределах выделенных на диаграмме рангов отвечает свойствам золотой пропорции Фибоначчи (интервалы содержания на врезке рис. 3):

$$\begin{aligned}
 PO (MO): & (0.005/0.003) = (0.003+0.005)/0.005 = 1.6, \\
 PЗ (МЗ): & ((0.004/0.005) \approx (0.005+0.007)/0.007 \approx 1.6, \\
 PP: & (0.013/0.008) = (0.013+0.008)/0.013 = 1.6, \\
 PУ: & (0.025/0.015) = (0.015+0.025)/0.025 = 1.6.
 \end{aligned}$$

Практическое использование модели

Так как содержание элементов в таблице модели дано в г/т, то ее использование существенно упрощает все процедуры обработки аналитических результатов геохимических съемок, поскольку отпадает необходимость использования вариационной статистики для определения геохимического фона и аномальных уровней. Для этого каждой ячейке в таблице модели присваивается отдельный условный знак определенной формы, размера и цвета, и в этой легенде делается автоматизированная разnosка аналитических результатов опробования территории (на рисунках этой

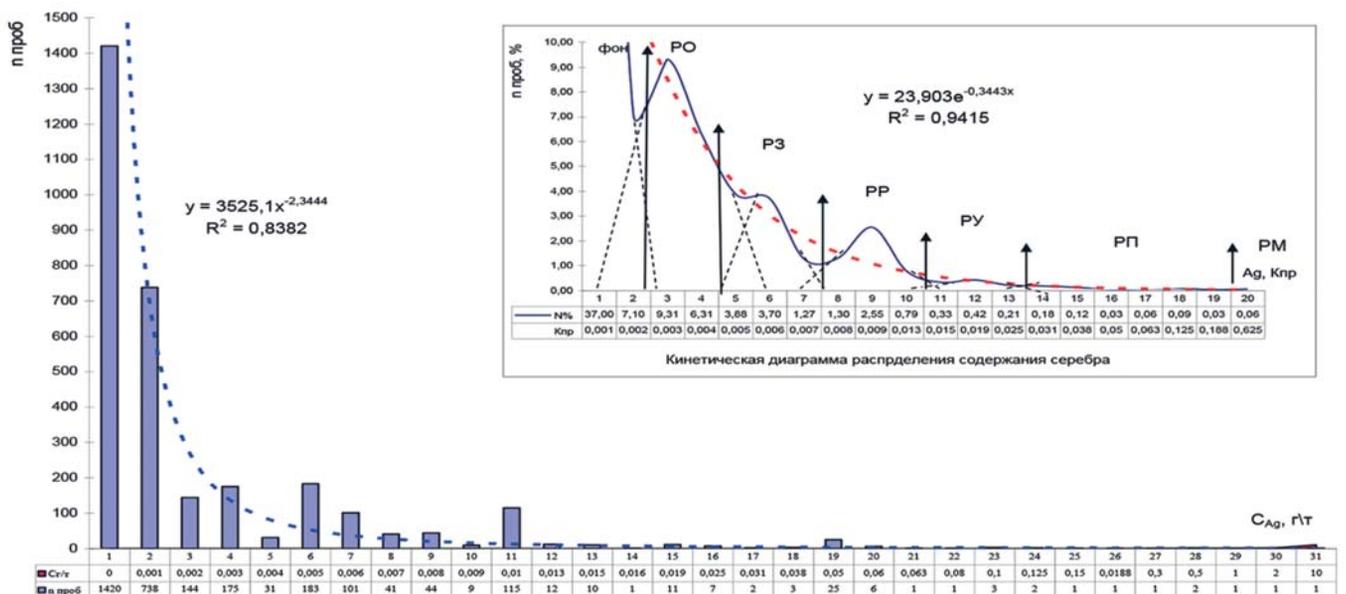


Рис. 3. Структурирование геохимического поля на основе гистограмм и графиков функции плотности распределения содержания элементов в пробах листов О-49, О-50 [7]. Основная диаграмма — гистограмма содержания серебра (г/т); врезка — кинетическая диаграмма распределения серебра (Клр). Пунктирными линиями отмечены совокупности проб, соответствующие рангам геохимического поля

статьи — с помощью программы ArcMap). Полученная таким образом карта-разноска пространственного распределения элементов по существу является модельным аналогом пространственной структуры АГХП опробованной территории и может использоваться для составления карт рудной специализации листов ГХО-1000, или ГХО-200, или других карт геохимического содержания. Например, на рис. 4 видно, что аномалии Sb и As соответствуют рангу РУ, тогда как аномалии VCrCuMn и др. — региональным рангам, т.е. как объекты промышленного накопления рудного вещества последние не имеют прямого поискового значения.

Пример карты рудной специализации АГХП листа М-53-III м-ба 1:200 000 (Балей) показан на рис. 5, где каждая точка опробования обозначена значком с максимальным содержанием элемента в пробах коренных пород. Скопления аномальных проб определенного ранга оконтуриваются вручную с учетом геологической обстановки. Пробы в контуре локального АГХП отбираются в отдельный файл (шейп-файл) и в дальнейшем обрабатываются по функциям детерминированной модели геолого-промышленным методом [8, 9].

В целом численная геохимическая модель позволяет не только районировать АГХП опробованной территории по рангам рудоносных структур, но и количественно оценить прогнозные ресурсы локальных аномалий. Например, вероятные ресурсы металла локальной аномалии Li, выделенной в юго-западной части вдоль контакта гранитоидов Борщевского массива (рис. 5), можно определить по формуле: $Q = \Delta S * K_{Sp} * C_p * K_{Cr} * H^{2.7}$, где C_p — заданная концентрации Li на заданную глубину прогноза H , ΔS — площадь влияния пробы, 2.7 — объемный вес породы. Зная модельное значение K_{Cr} и K_{Sp} (нижние строки табл. 3), в каждой точке опробования можно определить ресурсы Li и построить карту пространственного распределения ресурсов АГХП (рис. 6). Видно, что, несмотря на общую значительную протяженность полосы аномальных проб вдоль контакта гранитоидного массива, прогнозные ресурсы опираются только на две удаленные друг от друга точки опробования, поэтому промышленно значимые прогнозные ресурсы потенциального месторождения можно оценить как суммарные ресурсы двух блоков, умноженные на коэффициент рудо-

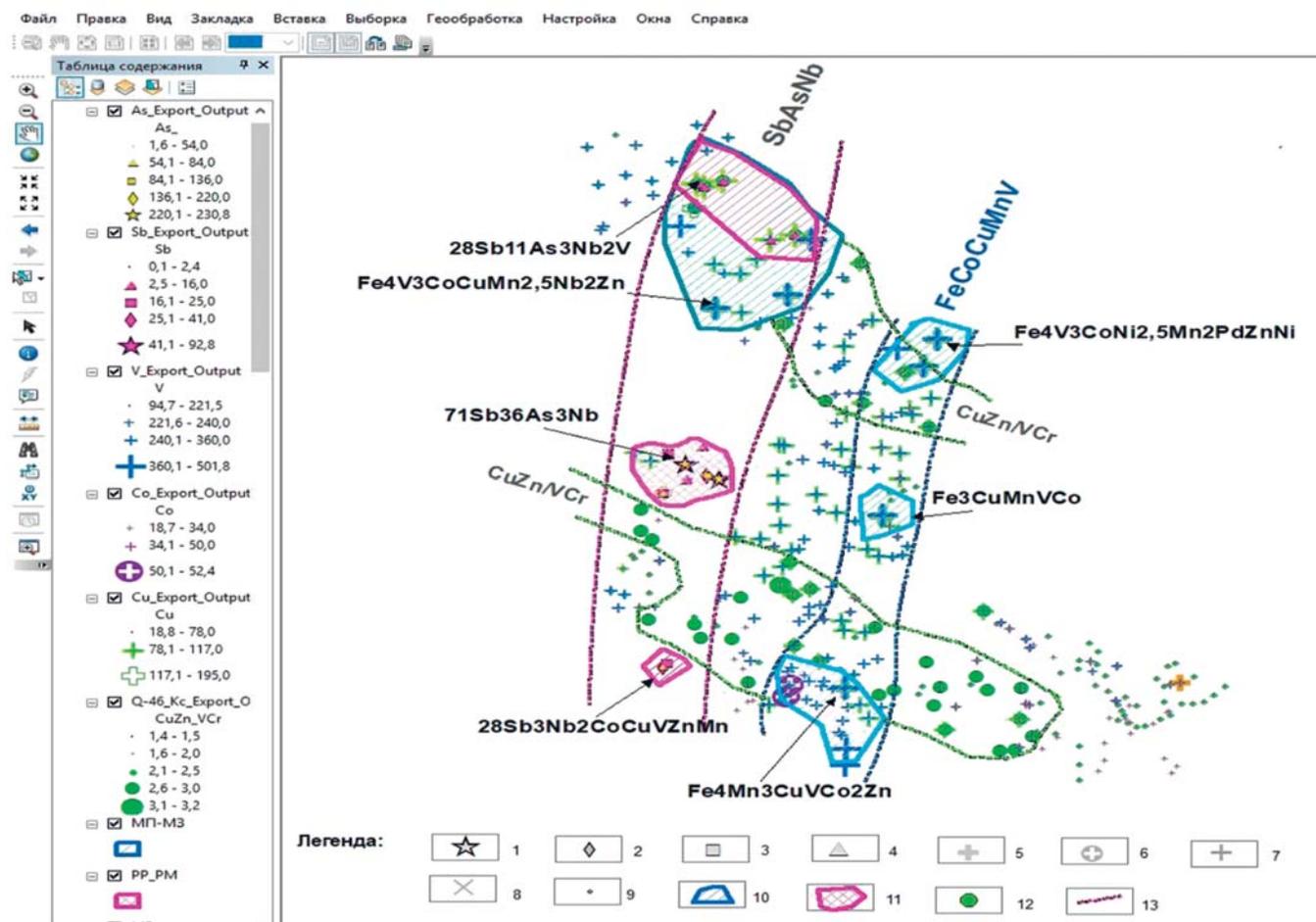


Рис. 4. Вид данных (экран монитора) карты-разновки, составленной по рангам модели по результатам донного опробования небольшого участка сибирских траппов в бассейне Нижней Тунгуски (300 проб с плотностью 1 проба на 300 км²) с элементами интерпретации: 1–8 — ранги АГХП: 1 — РМ, РТ; 2 — РП; 3 — РУ; 4 — РР; 5 — МЗ; 6 — МО; 7 — МП; 8 — ПМП; 9 — Кк; 10 — площадная аномалия ранга МП-МЗ; 11 — площадная аномалия ранга РР-РМ; 12 — индикатор халько(CuZn)-оксисидерофильной(VCr) обстановки среды рудообразования; 13 — границы МЗ. Состав АГХП показан в Кк

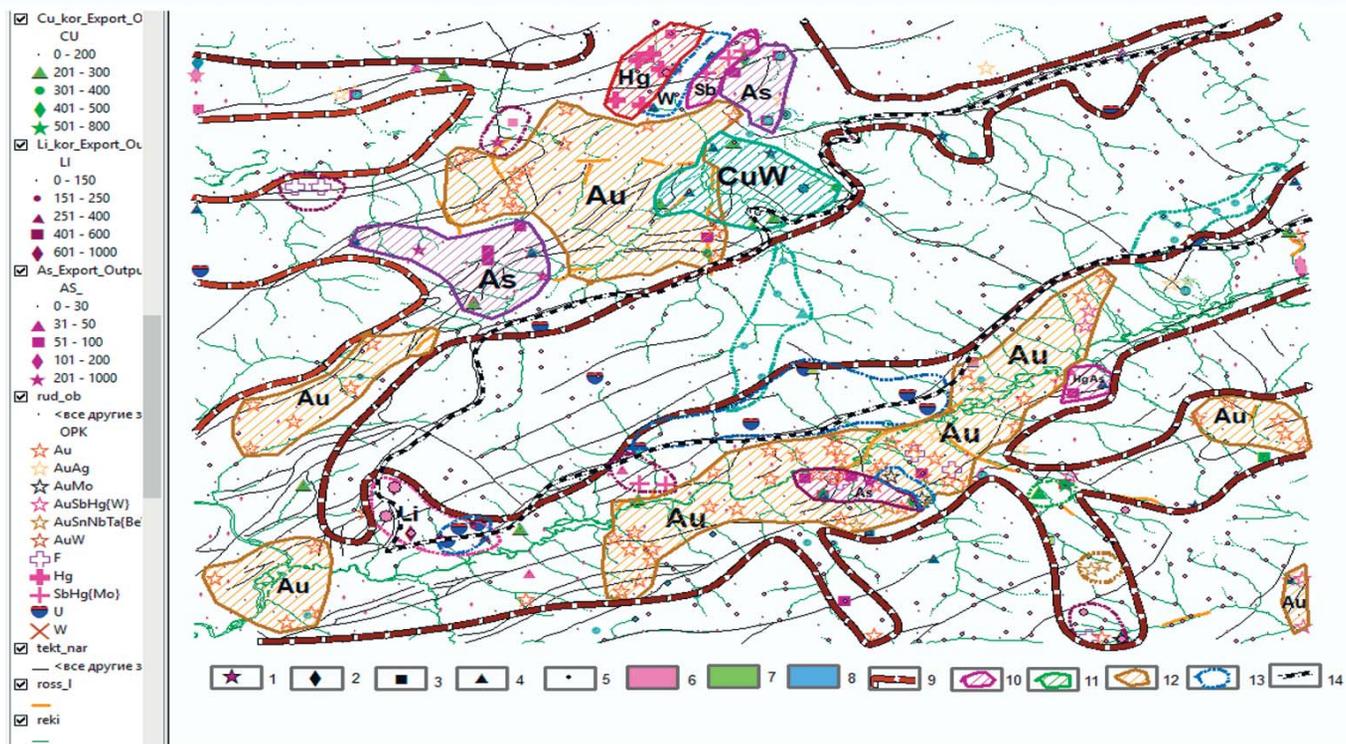


Рис. 5. (снимок экрана монитора, программа ArcMap). Вид карты рудной специализации АГХП листа М-53-III (Балей), составленной на основе численной геохимической модели континентальной земной коры: 1–5 — содержание элемента в пробе в соответствии с рангами модели земной коры: 1 — месторождение, 2 — рудное поле, 3 — рудный узел, 4 — рудный район, 5 — региональные металлогенетические зоны; 6–8 — цвета элементов: 6 — AsSbHgF(Li), 7 — CuPbZn, 8 — WNiCrV; 9 — граница Балейской рудоносной зоны; 10–13 — АГХП с рудоуправлениями и месторождениями: 10 — AsSbHgFLi, 11 — CuWCr, 12 — Au, 13 — U; 14 — контур выхода Борщевского гранитоидного массива на дневную поверхность. Некоторые другие условные обозначения показаны в «Таблице содержания» слева от макета карты

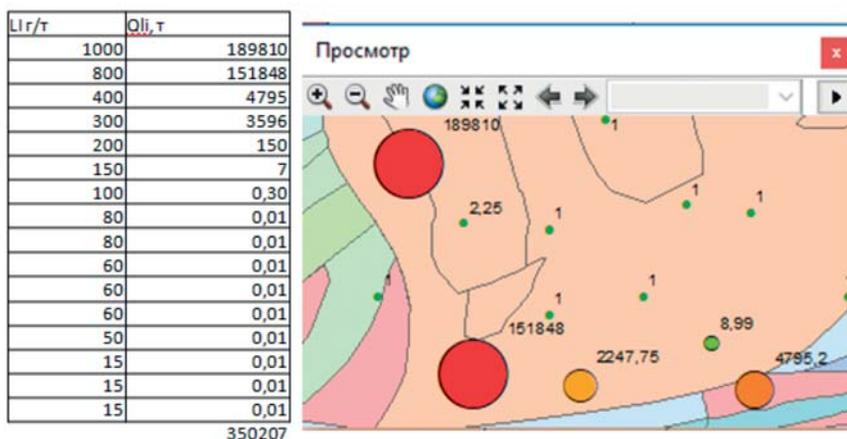


Рис. 6. (снимок экрана монитора, программа ArcMap). Пример оценки прогнозных ресурсов локальной аномалии Li, показанной на рис. 5. На рисунке ресурсы Li (т) выписаны рядом с точкой опробования

ности α , характеризующий промышленный тип месторождения:

$$Q = (189810 + 151848) * \alpha = \alpha * 341660 \text{ т.}$$

Дальнейший прогноз теряет смысл из-за отсутствия сведений о вещественном составе источника аномалии, который определяет промышленный тип потенциального месторождения и численное значение коэффициента рудоносности α .

Заключение

Новая концепция вычисления прогнозных ресурсов на основе численной модели АГХП земной коры обобщенно выглядит следующим образом:

1. Аномальное геохимическое поле земной коры имеет структуру, адекватную ее геодинамической структуре, что убедительно описывается рядом Фибоначчи.

2. Внутренняя фрактальность планетарного поля земной коры, выраженная в локальных скоплениях рудного вещества разного состава, размера и концентрации, описывается функциями, связывающими содержание рудного вещества, объем рудоносного блока и его коэффициенты промышленной рудоносности и промышленной концентрации.

3. Такая интерпретация позволяет осуществить количественный прогноз рудного вещества в АГХП региональных рангов.

4. Точность прогнозной оценки локальных геохимических аномалий зависит не только от плотности опробования, но и от представлений о промышленном типе потенциального месторождения, т.е. о его коэффициенте рудоносности α .

Грамотное вычисление прогнозных ресурсов, необходимое для экономического обоснования дальнейших ГРР, является ключевым условием развития отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры / Н.А. Григорьев // Геохимия. — 2003. — № 7. — С. 785–792.
2. Криночкин, Л.Н. Прогнозная оценка территории России по региональным аномальным геохимическим полям / Л.Н. Криночкин: Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. наук. — М.: ИМГРЭ, 2011. — 46 с.
3. Матерон, Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. — М.: Мир, 1968. — 407 с.
4. Овчинников, Л.Н. Прогноз рудных месторождений / Л.Н. Овчинников. — М.: Недра, 1992. — 308 с.
5. Металлогенический кодекс России. — М.: Геокарт-ГЕОС, 2012. — 126 с.
6. Сафронов, Н.И. Основы геохимических поисков рудных месторождений / Н.И. Сафронов. — Л.: Недра, 1971. — 216 с.
7. Силин, И.И. Парадигма поисковой геохимии / И.И. Силин // Отечественная геология. — 2009. — № 1. — С. 87–97.
8. Силин, И.И. Количественная оценка ресурсов твердых полезных ископаемых по геохимическим данным / И.И. Силин. — М.: Нобель Пресс, 2014. — 170 с.
9. Силин, И.И. Теория и технология вычисления прогнозных ресурсов геохимических аномалий / И.И. Силин // Рациональное освоение недр. — М.: ЦКР-ТПИ Роснедр и др., 2015. — № 4. — С. 22–29.
10. Гусев, Г.С. Тектонический кодекс России / Г.С. Гусев, Н.В. Межеловский, А.В. Гушин и др. — М.: Геокарт-Геос, 2016. — 340 с.
11. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000. — М.: ИМГРЭ, 2002. — 92 с.

© Коллектив авторов, 2019

Силин Игорь Иванович // igorivsil@yandex.ru
Килипко Виктор Алексеевич // kilipko@rambler.ru
Межеловский Николай Васильевич // centergeokart@mail.ru
Межеловский Илья Николаевич // minormin@mail.ru

УДК 662.346.3: (475.141)

Жураев М.Н., Якубов Ж.Я. (ТашГТУ), Хамдамов С.Р. (ГУП «Гиссаргеология»)

ОСНОВНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АПОМЕТАТЕРРИГЕННОГО ВОЛЬФРАМОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ САРЫКУЛЬ В КАРАТЮБИНСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ)

*В статье рассмотрены основные геохимические особенности апометатерригенного вольфрамового оруденения, приуроченного к фрагменту троговой структуры, выполненной породами олистостромового комплекса. Оруденение сформировано по породам грубого флиша, преобразованного в контактовой зоне гранитоидного интрузива, геохимически специализированного на вольфрам, в сланцевые породы, по которым образованы рудоносные метасоматиты. Рудный процесс имеет углекислую специфику и характеризуется существенным привнесом фосфора. Геохимическое поле сформировано элементами типоморфного комплекса (W — Bi — Cd — Te — Be — Au — Zn — Cu — Sn). **Ключевые слова:** Каратюбе, рудный район, рудное поле, апометатерриген, вольфрамовое оруденение, Сарыкуль, троговая структура, олистостромовый*

комплекс, рудоносные метасоматиты, типоморфный геохимический комплекс, шеелит, дисульфиды железа, скарноиды, гранитоиды, петрогенный.

Juraev M.N., Yakubov Zh.Ya. (TashSTU), Khamdamov S.R. (Gissargeologe)

MAIN GEOCHEMICAL FEATURES OF APOMETA-TERRIGENE TUNGSTEN MINERALIZATION (ON THE EXAMPLE OF THE SARYKUL DEPOSIT IN THE KARATYUBI ORE FIELD)

*The article discusses the main geochemical features of apometaterrigenous tungsten mineralization, timed to the fragment of the trog structure, made by rocks of the olistostromic complex. The mineralization is formed by rough flysch rocks, transformed in the contact zone of a granitoid intrusive geochemically specialized in tungsten, into shale rocks, from which ore-bearing metasomatites are formed. The ore process has carbon dioxide specificity and is characterized by a significant addition of phosphorus. The geochemical field is formed by elements of the typomorphic complex (W — Bi — Cd — Te — Be — Au — Zn — Cu — Sn). **Keywords:** Karatyube, ore region, ore fields, apometaterrigen, tungsten mineralization, Sarykul, trog structure, olistostrom complex, ore-bearing metasomatites, typomorphic geochemical complex, scheelite, iron disulfides, scarnoids, ganitoids, petrogenic.*

Каратюбинское рудное поле расположено в западной части Каратюбинских гор и приурочено к фрагменту Центральногиссарского трогообразного прогиба [10]. Рудное поле объединяет два объекта с различной рудно-формационной природой (месторождение Каратюбе — скарново-шеелитовой формации и месторождение Сарыкуль с новым для региона апометатерригенным вольфрамовым оруденением) (рис. 1).

Апометатерригенное вольфрамовое оруденение на месторождении Сарыкуль было выявлено в значительной степени случайно при проведении на площади поисковых работ на золото. Объектами поисков золота являлись зоны окварцевания в метатерригенных породах матрикса олистостромовой толщи, в последующем оказавшиеся вольфрамоносными [5, 9].

Апометатерригенное вольфрамовое оруденение развито на площади, которая своей южной частью охватывает эндоконтактовую зону Сарыкульского интрузива, который представляет собой тело овальной формы, вытянутой в широтном направлении. Площадь его составляет около 15 км². Плоскость северного контакта интрузива падает круто (65–80°) на юг, а южного — в том же направлении, но более полого — до 40°. Этот массив относится к гипабиссальным интрузивам. Интрузив формировался в сложных тектонических условиях, прорывая ядерную часть антиклинали, сложенную породами олистостромовой толщи.

Своеобразие геологического строения района заключается в приуроченности зон минерализации к фрагменту троговой структуры, выполненной породами олистостромового комплекса [1, 7].