

дой горелки были поставлены аппаратчики и началось коллективное практическое обучение. Работали сначала в одну смену. Каждый аппаратчик имел карту, которую обязан был заполнять. В ней необходимо было указывать номер квасцов, номер пудры, величину кристалла и его качество, состав газов и колебание давлений в них. Очень важно было установить связь между всеми фактами и качеством монокристалла. С одной стороны, это казалось преждевременным, поскольку мастерства у аппаратчиков не было, но, с другой стороны, надо было создать привычку к точному учету всех факторов. 015

Усилиями В.В. Ильина и С.К. Попова запустили все двадцать горелок. К сожалению, получалось много брака. Иной раз аппаратчица вырастит хороший кристалл, а потом она же производит только брак, и никто, даже профессор Ф.В. Сыромятников, не могут понять, почему все это происходит. Проведение исследований в Лаборатории кристаллографии АН СССР еще раз подтвердило, что кристаллы — действительно корунды со всей присущей им твердостью.

Цех работал с перерывами. Руководство завода было недовольно. Его можно понять. На строительство первой очереди цеха затратили немало денег, рассчитывали, что затраты окупятся быстро, но пока — одни убытки. Было принято решение приостановить строительство второй очереди. Начавшаяся война прервала работу по улучшению технологии процесса получения синтетического корунда и усовершенствованию оборудования для его выращивания. Не хватало водорода и кислорода, а донецкие квасцы, необходимые для изготовления шихты, остались на территории, захваченной врагом. Цех пришлось временно законсервировать.

Заключение

Большим научным достижением ВИМСа явилась разработка технологии процесса получения искусственного корунда (руководитель проф. Ф.В. Сыромятников) и проектирование первой в СССР опытно-промышленной установки для получения искусственного благородного корунда (рубин, сапфир) взамен импортного. Под руководством ВИМСа монтаж установки на Чернореченском химическом заводе был завершен в декабре 1937 г., а первые горелки зажжены в январе 1938 г. К 1 мая этого же года пуск установки первой очереди (20 горелок) был осуществлен на полную мощность. Из полуфабриката (пудры) получены кристаллы корунда рекордной величины — 207–250 карат.

В связи с успешным завершением задания Совета труда и обороны (постановление от 17.11.1935) о получении искусственного корунда, послужившего материалом для изготовления кремлевских звезд, в приказе ГГУ НКТП от 26.06.1938 № 279 были отмечены: Ф.В. Сыромятников (руководитель), В.В. Ильин, В.О. Диковский (инженер), В.Л. Миттрах, С.П. Добровольский (электромеханик), М.В. Федоров (механик). Путь от научно-исследовательских работ до промышленного производства отечественных синтетиче-

ских корундов был пройден всего за десять лет. Это позволило накануне Великой Отечественной войны наладить выпуск точной аппаратуры для оборонной промышленности с подпятниками из отечественного рубина и лейкосапфира, полностью отказавшись от экспорта этих материалов [5].

В 1945 г. на Чернореченском химическом заводе восстановили и значительно расширили прерванное войной производство синтетических корундов. В 1950 г. за создание аппаратуры и технологии производства рубинов А.В. Шубникову, С.К. Попову, В.В. Святухиной и А.И. Рукавишникову была присуждена Сталинская премия третьей степени.

При написании статьи использованы отчеты Лаборатории экспериментальной минералогии (1932–1939) и воспоминания Ф.В. Сыромятникова из рукописного фонда НТБ им. проф. В.В. Аршинова. Авторы выражают признательность за оказанную помощь при подборе материала для статьи сотрудникам ФГБУ «ВИМС»: Н.Э. Коростелевой, И.Е. Любимовой, Л.И. Полупановой, Г.В. Робустовой, Г.В. Румянцевой, Н.А. Серпер.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВИМС–LXXV / Гл. ред. А.Н. Еремеев. — М.: Недра, 1993. — 334 с.
2. Гумилевский, А.А. К 20-летию организации производства драгоценных искусственных камней (корунда) в СССР / А.А. Гумилевский // Информ. бюл. — М.: НИИЧаспром, 1948. — № 3 (16).
3. Егоров, В.И. Синтетические рубины и сапфиры / В.И. Егоров // Минеральное сырье. — 1935. — № 6. — С. 21–26.
4. Литвинов, Л.А. Производству монокристаллов корунда в СССР — 50 лет / Л.А. Литвинов / Монокристаллы и скантинилляторы, их получение и свойства. — Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1970. — С. 142–147.
5. Органы управления отраслью «Геология и разведка недр» от Геологического Министерства геологии СССР: [Справочник] / М-во геологии СССР. — Л.: Недра, 1990. — 687 с.
6. Рубин и сапфир / Отв. ред. Л.М. Беляев. — М.: Наука, 1974. — 236 с.
7. Чернореченский химический ... (50 лет) [1915–1965: сб. статей] / Сост.: Н.М. Серяков, Н.А. Липатов. — Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1965. — 311 с.
8. Элзулл, Д. Искусственные драгоценные камни: Пер. с англ. / Предисл. И.Я. Некрасова. 2-е изд. / Д. Элзулл. — М.: Мир, 1986. — 160 с.

© Печенкин И.Г., Луговская И.Г., 2019

Печенкин Игорь Гертурдович // pechenkin@vims-geo.ru
Луговская Ирина Германовна // lig_vims@mail.ru

УДК 550.84

Соколов С.В., Марченко А.Г. (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ И ПЛОТНОСТИ ОПРОБОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПЛОЩАДНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОГНОЗА

До настоящего времени в России при площадных геохимических работах разных масштабов широко используются полуколичественные методы анализа, высокая погрешность которых отчасти компенсируется избыточной плотностью сетей опробования. Обоснованы

*необходимость оптимизации сетей опробования со снижением их плотности, перехода от полуколичественных к количественным методам анализа и, при литохимических поисках по потокам рассеяния, исключения из опробования аллювия водотоков высоких порядков. **Ключевые слова:** геохимические работы, сети опробования, методы анализа проб, вторичные ореолы, потоки рассеяния, аномальное геохимическое поле, вероятность обнаружения объекта.*

Sokolov S.V., Marchenko A.G. (VSEGEI)

OPTIMIZATION OF THE NETWORK AND DENSITY OF SAMPLING DURING AREAL GEOCHEMICAL WORKS AS A FACTOR IN INCREASING FORECAST RELIABILITY

*To date, in Russia the semi-quantitative methods of analysis have been widely used for areal geochemical works at various scales. The high error of the methods is partly compensated by the excessive density of sampling networks. The necessity of the sampling networks optimization with a decrease in their density, the transition from semi-quantitative to quantitative methods of analysis, and exclusion of high-order watercourses from testing of alluvium in lithochemical prospecting for dispersion flows are substantiated. **Keywords:** geochemical works, sampling networks, sample analysis methods, secondary haloes, dispersion flows, anomalous geochemical field, probability of target detecting.*

В России наблюдается отставание от мировых стандартов уровня лабораторно-аналитического обеспечения геохимических работ (ГХР). Во многих случаях основными методами аналитических исследований на разных стадиях геологоразведочных работ (ГРП) и особенно при работах по составлению геохимических основ (ГХО) государственных геологических карт масштабов 1:1 000 000 третьего поколения (Госгеолкарты — 1000/3) и 1:200 000 второго поколения (Госгеолкарты — 200/2) остаются полуколичественные спектральный и спектрозолотометрический анализы. В редких случаях производятся аналитические определения элементов платиновой группы; нечасто применяются прецизионные количественные аналитические методы (ICP-AES, ICP-MS, XRF и др.).

Все это негативно сказывается на поисковой эффективности ГХР. Очевидно, что применение количественных методов анализа позволит существенно повысить точность аналитических определений и расширить набор определяемых химических элементов с пределом определения содержаний близким к кларку, на уровне кларка или даже ниже кларка земной коры (Au, Pt, Pd, As, Sb, Bi, W, Te и др.) и, как следствие, — надежность выделения слабых аномалий потенциально рудных объектов. Особое значение количественные методы анализа приобретают на региональной стадии ГХР масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000 при прогнозировании рудных районов (РР), узлов (РУ) и полей (РП), характеризующихся невысоким уровнем концентрирования химических элементов, а также рудных объектов ранга от РР до рудного тела (РТ) включительно

в сложных для поисков ландшафтных условиях закрытых и полузакрытых территорий с повышенной мощностью или аллохтонным характером рыхлых отложений. При переходе от полуколичественных к количественным методам анализа и соответственно возрастанию стоимости лабораторных работ важное значение приобретает оптимизация сети и плотности опробования при съемках различными геохимическими методами.

Выбор методов геохимических поисков определяется ландшафтными условиями проведения и масштабом ГХР. При площадных съемках чаще всего применяются методы литохимических поисков по потокам рассеяния с опробованием аллювиальных и пролювиальных отложений или по вторичным ореолам рассеяния с опробованием рыхлого покрова.

На стадии регионального геологического изучения на открытых территориях расчлененных горных районов, характеризующихся высокой плотностью и разветвленностью речной сети, ведущая роль по праву принадлежит литохимическим съемкам по потокам рассеяния масштабов 1:200 000 и 1:1 000 000, так как именно результаты опробования аллювия, характеризующие бассейны водосбора соответствующих водотоков, позволяют получить наиболее полную и непрерывную характеристику распределения содержаний химических элементов на значительных по площади территориях вне зависимости от степени их геологической изученности.

При крупномасштабных и детальных поисковых работах масштабов 1:50 000, 1:25 000, 1:10 000 и крупнее на открытых территориях активно денудированных районов широко применяется литохимический метод поисков по остаточным, преимущественно механическим вторичным ореолам рассеяния с отбором проб по регулярной сети. На полузакрытых и закрытых территориях в условиях сглаженного, плоского или волнистого рельефа, характеризующегося повышенной мощностью или дальнеприносным характером рыхлых отложений, используются методы геохимических поисков по наложенным сорбционно-солевым вторичным ореолам рассеяния, которые проводятся, как правило, тоже по регулярной сети.

Плотность опробования при съемках как по потокам рассеяния, так и по вторичным ореолам определяется масштабом ГХР и соответственно рангом (площадью) объекта прогноза, а также морфологией искомого объекта. Применяемая сеть опробования должна обеспечивать высокую вероятность выявления, надежность оценки численных параметров и других характеристик, прогнозируемых рудогенных систем. Считаем, что при использовании количественных методов анализа для уверенного выявления геохимических аномалий, связанных с искомыми объектами, в их контурах должно быть отобрано не менее двух проб, а для достаточно надежного определения численных параметров и других характеристик аномальных геохимических полей (АГХП) рудных объектов — не менее четырех проб (последнее

Таблица 1

Плотность опробования и вероятность выявления объектов поисков двумя пробами (П) при литохимических съемках по вторичным ореолам рассеяния с использованием квадратной и прямоугольной сетей

Масштаб съемки	Основной объект прогноза и поисков	Минимальная и максимальная площади АГХП объекта, км ²	Квадратные и близкие к ним сети			Прямоугольные сети по «Инструкции...» [5]	
			Плотность опробования (сеть)	Количество проб на объект	П, %	Плотность опробования (сеть)	Количество проб на объект
1:1 000 000	РУ	100	10 × 10 км	1	26	—	—
		“	10 × 5 км	2	59		
		1000	10 × 10 км	10	100		
1:200 000	РП	10	2 × 2 км	2,5	71	2000 × 200 м	25
		“	1 × 1 км	10	100		
		100	2 × 2 км	25	100		
1:50 000	РМ	1	500 × 500 м	4	91	500 × 50 м	40
		“	500 × 250 м	8	100		
		10	500 × 500 м	4	100		
1:25 000	РМ или РТ	0,1	250 × 250 м	1,6	48	250 × 50 м	8
		“	250 × 100 м	4	91		
		1	250 × 250 м	16	100		
1:10 000	РТ	0,1	100 × 100 м	10	100	100 × 20 м	50
		0,1	100 × 50 м	20	100		
		1	100 × 100 м	100	100		
1:5 000	РТ	0,01	50 × 50 м	4	91	50 × 10 м	20
		0,1	50 × 50 м	40	100	50 × 20 м	200

* Площади объектов приведены по работам [2, 9, 10 и др.]

условие позволяет уверенно оконтуривать АГХП по уровню отклонения от фона на два стандартных отклонения).

При площадных ГХР по вторичным ореолам рассеяния масштабов от 1:200 000 до 1:50 000 в соответствии с «Инструкцией по геохимическим методам поисков...» [5] и «Методическими рекомендациями...» [7] рекомендуется использовать прямоугольные сети опробования с расстоянием между профилями, равным 1 см карты отчетного масштаба, и шагом по профилю в 10 или 5 раз меньше расстояния между профилями. В этом варианте имеем, как правило, десятки и сотни проб, приходящихся на АГХП (табл. 1), что, как будет показано ниже, является избыточным их количеством для выявления АГХП рангов РУ, РП и РМ, а вероятность выявления вторичных ореолов отдельных рудных тел (РТ) остается все равно пренебрежимо низкой.

Вероятность выявления локального рудного объекта при использовании прямоугольных сетей геохимической съемки принято оценивать по формуле Бюффона [11, 12], которая предназначена для вычисления вероятности пересечения предельно узкого линейного объекта (отрезка прямой линии заданной длины) прямоугольной сетью наблюдений. Вместе с тем эта формула не вполне корректна для оценки вероятности выявления соответствующего линейного вторичного ореола рассеяния по двум причинам: 1) вдоль профи-

лей производится не непрерывное опробование, а дискретное с заданным шагом, который сопоставим с шириной пересекаемого ореола либо превышает ее; 2) форму вторичного ореола линейного рудного тела (например, рудной жилы) правильнее аппроксимировать, с учетом бокового рассеяния, не отрезком прямой линии, а эллипсом, длина которого многократно превышает ширину. Принимая это во внимание, вероятность выявления эллипсовидного вторичного ореола по прямоугольной сети двумя точками опробования можно приближенно оценить как произведение вероятности P_1 пересечения эллипса прямоугольной сетью по формуле Дж. С. Дэвиса [4] на условную вероятность попадания двух точек опробования в контур эллипса при условии его пересечения профилем P_2 :

$$P_1 = \frac{2}{\Delta x} \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}; \quad P_2 = \frac{\Delta y}{b}; \quad P = P_1 \times P_2,$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипса, Δx — расстояние между профилями, Δy — шаг опробования по профилю.

Расчеты показывают (табл. 2), что вероятность выявления вторичных ореолов отдельных линейных рудных тел при расстоянии между профилями 500 м (масштаб съемки 1:50 000) пренебрежимо мала даже при шаге опробования по профилю 50 м. Поэтому перед

Таблица 2
Вероятность выявления вторичных ореолов отдельных линейных рудных тел двумя пробами при литохимических съемках по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:50 000

Сеть	Длина ореола, м	Максимальная ширина ореола, м	Вероятность выявления, %
500 × 500 м	200	20	1
500 × 250 м	“	“	1
500 × 100 м	“	“	3
500 × 50 м	“	“	6
500 × 500 м	400	40	2
500 × 250 м	“	“	5
500 × 100 м	“	“	11
500 × 50 м	“	“	23

ГХР масштабов 1:200 000–1:50 000 не должна ставиться задача обнаружения отдельных рудных тел — эта задача заведомо не решаема, поскольку вероятность успеха ненамного больше, чем вероятность счастливого выигрыша в лотерею.

Задача при ГХР указанных масштабов должна состоять в выявлении и интерпретации АГХП объектов старших рангов — РУ, РП и РМ. Известно, что АГХП этих объектов имеют, как правило, изометричную или овальную форму [9, 10 и др.]. Следовательно, не требуется применять прямоугольные сети с шагом по профилю в 5–10 раз меньшим межпрофильного расстояния. Эти объекты могут быть зафиксированы и по более редкой квадратной сети опробования или прямоугольной сети с шагом по профилю, лишь в 2–2,5 раза отличающимся от межпрофильного расстояния. Вероятность (П) обнаружения таких объектов произвольной формы с попаданием в их контуры не менее чем двух точек опробования может быть оценена по приближенной формуле А.М. Шурыгина [11, 12]:

$$P = 1 - e^{-\frac{S}{\Delta S} \left(1 + \frac{S}{\Delta S}\right)},$$

где S — площадь объекта поисков; $\Delta S = \Delta x \cdot \Delta y$ — площадь ячейки съемочной сети, где Δx — расстояние между профилями, Δy — шаг опробования по профилю.

Расчеты показывают (табл. 1), что вероятность обнаружения объектов произвольной формы при минимальной плотности опробования по квадратной сети 1 проба на 1 см² карты масштаба работ колеблется от 26 % для АГХП РУ площадью 100 км² (сеть 10 × 10 км) до 91 % для АГХП РМ площадью 1 км² (сеть 500 × 500 м) и 100 % для АГХП площадью 0,1 км² при сети 100 × 100 м. Во многих случаях вероятность обнаружения основных объектов прогноза при заданном масштабе съемки и использовании более редких, чем в «Инструкции...» [5] сетей составляет более 90 %, при этом они фиксируются достаточно представительным количеством проб (4 и более), что в целом обеспечивает надежность выявления АГХП рудных объектов и итоговых прогнозно-поисковых построений.

С позиций экономической целесообразности при достаточной вероятности выявления основного объ-

екта поисков квадратные или близкие к квадратным сети, характеризующиеся более низкой в сравнении с прямоугольной сетью плотностью опробования, нашли широкое применение в мировой практике (Финляндия, Канада, США, Австралия, Китай и др.) в первую очередь при производстве региональных ГХР. Показателен в этом плане опыт Китая, территория которого за последнее десятилетие практически полностью покрыта в стадийном режиме геохимическими съемками с использованием квадратных сетей опробования от глобального уровня (сети 160 × 160, 40 × 40 км) до регионального в масштабах 1:5 000 000–1:1 000 000–1:200 000 (сети 20 × 20, 10 × 10, 2 × 2 км) с заверкой перспективных площадей на локальном уровне в масштабах 1:50 000–1:20 000 (500 × 500, 200 × 200 м) [15].

Проиллюстрируем проявленность известного рудного объекта во вторичных ореолах, выделенных при разной плотности геохимического опробования, на примере платинометалльно-золото-медного месторождения Озерное (Полярный Урал). Месторождение представлено рудной зоной протяженностью 3 км при мощности в раздувах до 50 м. Площадь в районе объекта характеризуется пестрой ландшафтной обстановкой с чередованием открытых и закрытых участков. Площадные работы масштаба 1:50 000 (сеть 500 × 500 м) проводились по наложенным сорбционно-солевым вторичным ореолам рассеяния методом анализа сверхтонкой фракции — МАСФ [2] с определением содержания элементов относительно затратным количественным методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS).

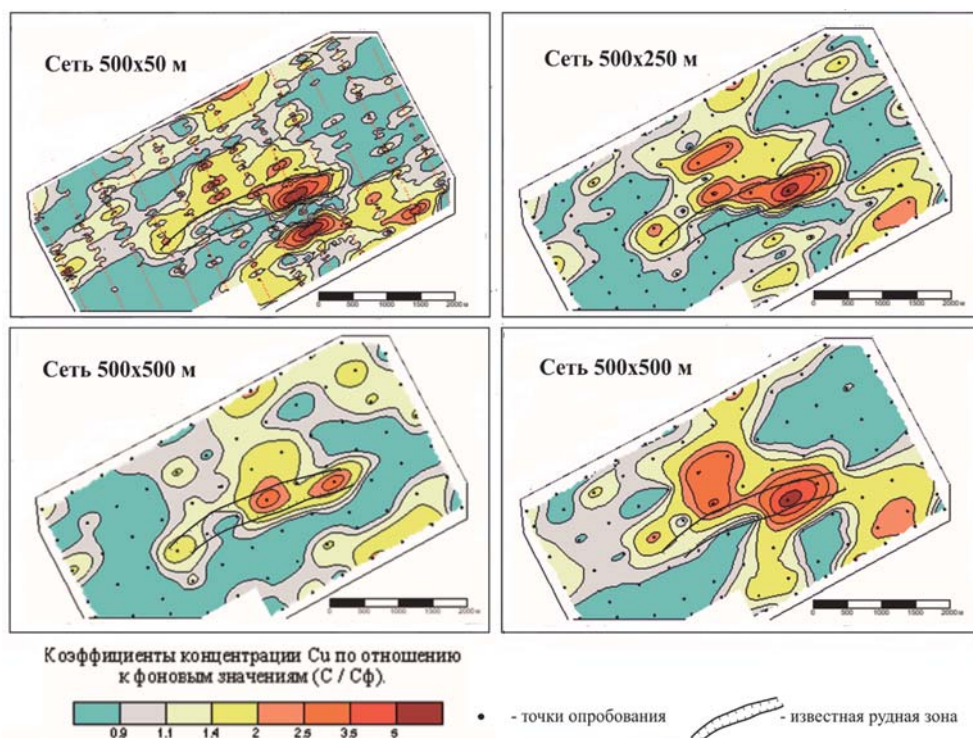


Рис. 1. Вторичные ореолы меди на платинометалльно-золото-медном месторождении Озерное (Полярный Урал)

На рис. 1 приведены вторичные ореолы меди (главный рудный элемент), построенные по исходной сети 500×50 м и по разреженным сетям 500×250 и 500×500 м (со смещенными друг относительно друга вариантами размещения точек разреженных сетей). Как видно из рис. 1, известная рудная зона наиболее тесно пространственно коррелирует с ореолами меди, выделенными по сетям 500×50 и 500×250 м и менее четко, но достаточно уверенно выявляется по сети 500×500 м. Таким образом, применение на участке более редкой сети опробования с сокращением количества отобранных проб в 5–10 раз не сказывается негативно на надежности обнаружения рудного объекта. В то же время, сокращение проб в 5–10 раз фактически приводит к адекватному сокращению стоимости полевых и дорогостоящих лабораторных работ с определением рудных элементов количественными методами.

Аналогичная ситуация при разрежении сети опробования просматривается и при региональных работах по вторичным ореолам рассеяния более мелких масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000, которые в основном проводятся на закрытых территориях (на открытых площадях более эффективна съемка по потокам рассеяния). В целом же отметим, что предложения по использованию более редких, чем рекомендовано «Инструкцией...» [5] сетей геохимического опробования высказывались и ранее [2, 9].

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что при проведении площадных работ по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:50 000 и мельче переход от прямоугольной к квадратной (или близкой к квадратной) сети с соответствующим уменьшением плотности опробования позволяет существенно уменьшить трудозатраты на пробоотбор, с наименьшими финансовыми затратами перейти от полуколичественных к количественным методам анализа проб и, как следствие такого перехода, повысить надежность выявления искомого объекта и прогноза оруденения. В этой связи многие крупные российские горнодобывающие компании (ООО «Нордголд», ООО «Полиметалл», ПАО «ГМК «Норильский Никель» и др.) при ведении геохимических поисковых работ уже широко используют или находятся в процессе внедрения разреженных, в том числе квадратных сетей опробования в комплексе с высококачественными и высокопроизводительными аналитическими методами.

Иная ситуация имеет место с выбором сетей опробования при проведении детальных геохимических поисков масштабов 1:25 000–1:10 000–1:5 000 объектов ранга рудное тело. Выбор сети в этом случае производится с учетом морфологии и площадных параметров ожидаемого рудного объекта. Для поиска линейных рудных тел, длина которых по простиранию многократно превышает мощность (например, золоторудных жил) более эффективны прямоугольные сети с шагом по профилю, который в два и более раз меньше ширины линейно вытянутых вторичных ореолов. Рас-

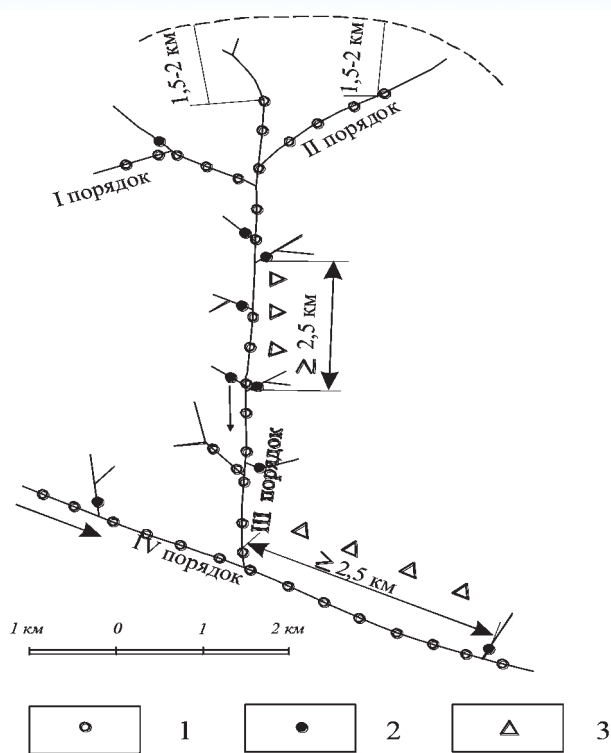


Рис. 2. Принципиальная схема опробования при региональной литохимической съемке масштаба 1:200 000 по потокам рассеяния (Методические рекомендации ..., 1992): 1 — точки отбора рядовых проб шагом 500 м; 2 — точки отбора двойных проб шагом 50 м; 3 — пробы из рыхлого элювия-делювия

четы вероятности обнаружения ореолов могут быть выполнены по формулам для эллипсовидных вторичных ореолов, приведенных выше.

Рассмотрим теперь методику геохимической съемки по потокам рассеяния масштаба 1: 200 000 с позиций экономической рентабельности и надежности выявления рудных объектов. В соответствии с «Инструкцией...» [5] и «Методическими рекомендациями...» [8] опробование аллювия водотоков в масштабе 1:200 000 проводится с шагом 500 м, начинается в 1,5–2 км от водораздела и заканчивается в 10–15 км вниз по течению (рис. 2). В соответствии с этой схемой опробованию подвергаются аллювиальные отложения водотоков I, II, III и, как правило, IV порядков (нумерация от верховьев речных систем). Ручьи I порядка длиной до 1,5–1,8 км опробуются только в приустьевой части двумя пробами с расстоянием между ними 30–50 м (рис. 2). Плотность опробования в активно денудированных районах составляет, как правило, около 1 пробы на 1 км².

Приведенная схема опробования, на первый взгляд, позволяет достаточно полно и объективно охарактеризовать распределение содержаний химических элементов в коренном субстрате на исследуемых площадях. Вместе с тем, она не учитывает различия процессов формирования аномальных потоков рассеяния в водотоках разных порядков, что может привести в различной степени к нарушению корреляции между содержаниями элементов в аллювии водотоков и

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между корреляционными матрицами коренного оруденения и гипергенных аномалий на объектах Северо-Востока (Методические рекомендации..., 1992)

Номер объекта	Вид аномалии	Вторичный ореол	Поток I порядка	Поток II порядка	Поток III порядка
1	Первичный ореол	0.86	0.63	0.32	0.07
2		0.78	0.42	0.34	-0.09
3		0.92	0.54	0.47	0.21
1	Вторичный ореол		0.63	0.38	0.16
2			0.37	0.29	-0.09
3			0.48	0.21	-0.24
1	Поток I порядка			0.21	-0.04
2				0.29	0.02
3				0.34	-0.12
1	Поток II порядка				0.24
2					-0.07
3					0.32
% значимых связей		100.0	100.0	55.6	8.3

Примечание: объекты: 1 — Серебряный, 2 — Кент, 3 — Угрюмый; критическое значение коэффициента парной корреляции при 5-процентном уровне значимости $r_{5\%} = 0.294$.

коренных породах. С этих позиций рассмотрим достоверность прогнозных построений по данным опробования аллювиальных отложений верховьев и нижних частей речной сети.

Модель идеального потока рассеяния, предложенная А.П. Солововым еще в 1959 г. [11, 12] и вошедшая в «Инструкцию...» [5], основана на представлениях о формировании в русле реки «средней пробы» всего бассейна денудации, т.е. о равномерном поступлении материала в водоток со всей площади бассейна водосбора, расположенного выше точки опробования. Такая модель хорошо соблюдается только в руслах водотоков первого, в меньшей степени второго порядка, что подтверждается данными определения корреляции между содержаниями элементов в системе первичный ореол — вторичный ореол — поток рассеяния (табл. 3).

Приведенные в таблице 3 данные свидетельствуют о том, что распределение элементов в коренном субстрате объективно отражают только содержания элементов в аллювии водотоков I и в меньшей степени II порядков ($r > r_{5\%}$). Следовательно, геометризация рудогенных систем, оценка формационной принадлежности и прогнозных ресурсов коренных источников потоков рассеяния, изучение зональности АГХП могут корректно осуществляться только по данным опробования верховьев речных систем.

Имеющие место отклонения состава аллювия в водотоках высоких порядков от состава «средней пробы» с позиций А.П. Соловова обусловлены возрастающей ролью в его составе материала ближних склонов. В этой связи для оценки прогнозных ресурсов (и только!) А.П. Солововым и Ю.В. Шваровым была предложена модель «реального» литохимического потока рассеяния, учитывающая, по мнению авторов, дисбаланс в аллювии водотоков высоких порядков матери-

ала ближнего сноса и привнесенного с верховьев бассейна водосбора [11, 12]. Апробация модели преимущественно в ландшафтах горных районов Северо-Востока России, т.е. в идеальных условиях по применимости геохимического метода поисков по потокам рассеяния в целом дала положительные результаты. Вместе с тем, существуют многочисленные случаи, при которых наблюдаются значительные отклонения формирования потоков и от этой «реальной» модели, а именно:

1. В таежных, лесотундровых, реже тундровых трансэлювиальных ландшафтах пологих склонов и склонов средней крутизны, характеризующихся высокой степенью задернованности, залесенности и заболоченности, составляющих не менее 50 % территории России, по данным Г.И. Хорина, В.П. Бородина и А.А. Матвеева [8], денудация резко замедлена, роль делювиального смыва на два-три порядка ниже, чем в модели А.П. Соловова и Ю.В. Шварова. Другими словами, содержания элементов в аллювии водотоков высоких порядков преимущественно определяются материалом, привнесенным с верховьев бассейна водосбора, а не с ближних склонов.

2. В горных районах, характеризующихся в целом расчлененным рельефом, вниз по течению речных систем наблюдаются аналогичные вышеприведенному случаю тенденции, когда расчлененность рельефа уменьшается, борта рек имеют террасовое строение, а ширина террас достигает нескольких сотен метров. Показателен в этом плане пример С.А. Григорова [3] по Кизил–Дереинскому полиметаллическому рудно-полю Северного Кавказа, характеризующемуся резко расчлененным рельефом. Однако месторождение Кизил–Дере не отражается аномальным потоком рассеяния, несмотря на то что два рудных тела обнажаются на поверхности в бортах ручья III порядка.

3. В районах широкого развития россыпных проявлений полезных ископаемых (Au, Sn и др.) установлено [1 и др.], что в перекрывающих россыпи рыхлых отложениях образуются гипергенные ореолы широкого круга элементов (Au, Ag, W, Cu, As, Co, Ni, Y, V, Ba, Hg и др.). При этом ореолообразующие свойства россыпей возрастают от водотоков I порядка к водотокам старших порядков.

В последнем случае характерна полигенность источников повышенных содержаний элементов в аллювии: с одной стороны, это коренной субстрат, с другой — гипергенные ореолы россыпей. Реального механизма выделения полезной составляющей, связанной с коренными породами, в настоящее время не существует, а использование полигенного сигнала определяет высокую дисперсию и непредсказуемость значений коэффициентов соответствия поток — вторичный ореол, что в конечном итоге резко сокращает возможности прогноза ресурсов в таких районах, приводит к существенному искажению контуров природных рудообразующих систем (РС) в сторону их расширения.

Рассмотренные выше условия и ситуации в природе весьма типичны, а, следовательно, роль аккумуляции материала от рудных тел ближних склонов в русло современных водотоков высоких порядков в модели А.П. Соловова и Ю.В. Шварова преувеличена и отражает лишь частный случай многообразных и сложных процессов формирования аномальных потоков рассеяния. Показано [6], что в зависимости от соотношения динамических параметров поведения в литохимическом потоке рудного и породного материалов могут формироваться резко различные по своим параметрам потоки рассеяния, в том числе такие, расчетные величины продуктивностей которых, в отличие от моделей «идеального» и «реального» потоков, могут даже возрасти вниз по течению за пределами интервала поступления рудного материала с ближайших склонов.

Отсутствие реального механизма учета знакопеременных отклонений содержаний элементов от «средней пробы» ставит под сомнение надежность оценки геохимических характеристик прогнозируемого оруденения и соответственно возможность корректного применения в прогнозных построениях результатов опробования аллювия водотоков высоких порядков.

Другим важным условием применимости той или иной системы опробования, определяющей плотность геохимических наблюдений, является надежность выявления с ее использованием рудогенных систем (РС), соответствующих масштабу проводимых геохимических работ. Оценка надежности выделения РС с использованием опробования только аллювиальных отложений водотоков I порядка осуществлялась на примере конкретного листа N-51-IV масштаба 1:200 000 на территории Амурской области, характеризующегося среднерасчлененным рельефом со средней густотой речной сети. Для этого вся территория листа разбивалась на равные ячейки, по площади соответствующие мелкому, среднему, крупному месторождению и среднему рудному полю. Далее определялась доля суммарной площади ячеек конкретного размера, частично (более чем наполовину) или полностью совпадающих с выделенными бассейнами водосбора водотоков I порядка, от площади всего листа. Полученная таким образом вероятность обнаружения рудного объекта (П) заданного размера отражена в табл. 4.

Таблица 4
Вероятность обнаружения рудных объектов (П) различной площади (лист N-51-IV)

Ранг объекта	Масштаб объекта	Размеры ячейки, км	N_0	N_1	П (%)
РМ	Мелкий	1×1	3837	800	79
	Средний	2×2	944	151	84
	Крупный	3×3	440	37	92
РП	Средний	6×6	123	0	100

Примечание: N_0 — общее количество ячеек заданного размера в рамках листа, приходящихся на площадь, благоприятную для постановки литохимической съемки по потокам рассеяния, N_1 — количество ячеек вне контуров бассейнов водосбора водотоков I порядка.

Как видно из таблицы, по данным опробования водотоков I порядка со 100 % вероятностью выделяются РС ранга РП и с высокой вероятностью (79–92 %) — РС ранга РМ. Следовательно, путем опробования водотоков только I порядка, исключая из опробования водотоки более высоких порядков, можно уверенно рассчитывать на выявление основных объектов прогноза и поисков при ГХР 1:200 000 — потенциальных рудных полей (табл. 1) и в ряде случаев — на выявление участков потенциальных рудных месторождений для постановки на них в дальнейшем поисковых работ более крупного масштаба.

В контексте эффективности использования опробования водотоков различных порядков при прогнозно-поисковых построениях рассмотрим различные варианты выделения геохимических ореолов рудных объектов на геохимических картах.

В традиционном способе отражения результатов поисков по потокам рассеяния химический состав и аномальные содержания элементов в аллювии показываются в виде линий различного цвета и толщины [5, 8]. Этот способ широко используется на практике, однако он не лишен ряда недостатков: не отражает полностью всей получаемой информации о закономерностях поведения элементов; такие материалы трудно сопоставлять с геофизическими и геологическими данными; этот способ не дает полного представления о структуре АГХП; выделение ореолов выноса технологически трудно осуществимо.

В других вариантах отражение аномальных потоков обычно осуществляется в точечно-символьном виде (содержание в каждой точке опробования отображается символом, например, кружочком, размер или цвет которого соответствует определенному диапазону содержаний), либо в изолиниях.

По другому способу, предложенному Г.И. Хорным с соавторами [13], при построении сводных карт геохимических полей по результатам поисков масштаба 1:200 000 с использованием инструктивной схемы пробоотбора во внимание принимаются только точки опробования водотоков I порядка с равными бассейнами водосбора площадью 3–5 км². По мнению авторов статьи, в исключительных случаях, а именно для водотоков I порядка протяженностью более 5 км, площадь бассейна рационально увеличить до 6–8 км². Это делается с целью исключения пропуска рудных объектов, находящихся на склонах нижней части таких водотоков. Далее для проб, расположенных в контурах таких бассейнов, рассчитываются средние содержания всех анализируемых элементов, которые относят к центру этих бассейнов. В качестве примера на рис. 3 представлен фрагмент составленной таким способом карты фактического материала территории Северного Приамурья. Затем проводится оконтуривание ореолов в изолиниях стандартным способом.

Для отображения потоков рассеяния в изолиниях применялся и метод скользящего окна с различной площадью ячейки осреднения. При этом использо-

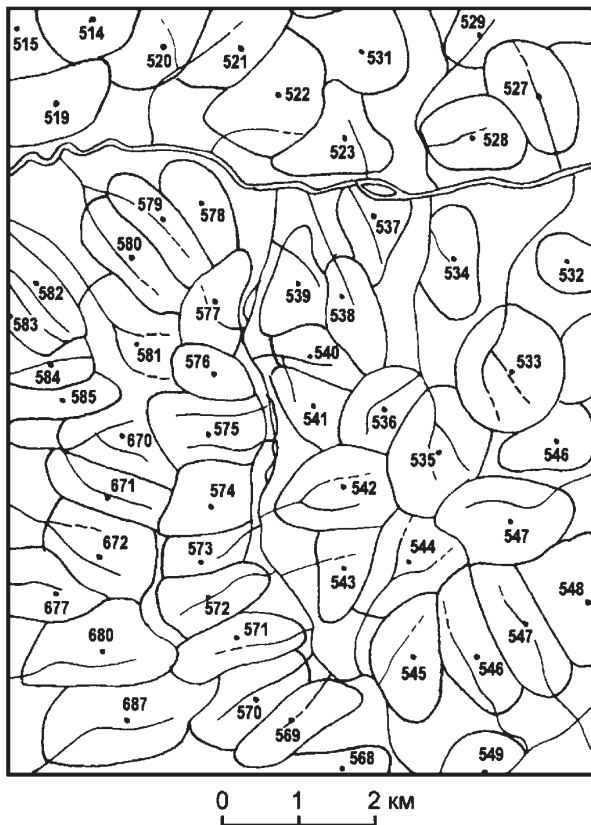


Рис. 3. Фрагмент карты фактического материала территории Северного Приамурья

вались содержания элементов во всех точках опробования, попадающих в элементарную ячейку, в том числе и водотоков II–IV порядков. Было установлено, что увеличение размеров скользящего окна приводит к усилению корреляции между содержаниями в потоках и вторичных ореолах рассеяния от ее отсутствия до значимой корреляции при размерах ячейки 49 км^2 и более [12]. Несмотря на это, при автоматизированной обработке геохимической информации в рамках действующих программных систем (ГЕОСКАН, АСОИ–Геология, Регион и др.) в основном используются исходные данные, полученные при осреднении с площадью ячейки значительно меньшей 49 км^2 .

Каждый из двух последних способов отражения аномальных потоков рассеяния в изолиниях содержаний имеет свои достоинства и недостатки. Так, применение первого из них, по утверждению А.П. Соловова, не подкрепленному какой-либо аргументацией [12], приводит к большой потере информации и способствует получению неверных результатов. Использование второго способа осложняется тем, что содержания элементов в аллювии не обладают свойством аддитивности, так как площади бассейнов водосбора точек опробования варьируют в широких пределах, от $n \times 10^{-1}$ до $n \times 10^1 \text{ км}^2$. В этой связи предлагалось применять способы отражения потоков рассеяния в изолиниях только при мелкомасштабных обобщениях [12].

Очевидность такого вывода по отношению ко второму способу отображения аномальных потоков не вызывает сомнения. Однако результаты практического использования способа Г.И. Хорина с соавторами при составлении сводных карт на значительные по площади территории Дальнего Востока (Амурская, Магаданская области, Чукотский национальный округ) находятся в явном противоречии с точкой зрения о практической непригодности этого способа. В качестве положительного примера его практического применения представлена результирующая прогнозно-геохимическая карта в 200-тысячной разграфке западной части территории Амурской области, составленная по данным геохимических съемок по потокам рассеяния масштаба 1:200 000 с учетом только точек опробования аллювия водотоков I порядка (рис. 4).

Результаты этих исследований позволили унифицировать подходы к дифференциации геохимических объектов по степени перспективности; уточнить существующие, а в ряде случаев и обосновать новые представления о структурно-геологических закономерностях размещения полезных ископаемых; осуществить ревизию рудоносности известных РС и выделить новые потенциальные РУ, а также РП, т.е. реализовать в полной мере возможности геохимических поисков данного масштаба; оценить ресурсный потенциал территории в целом; провести научно обоснованный выбор перспективных площадей для постановки прогнозно-поисковых работ более крупного масштаба.

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что рациональность и приоритетность технологии опробования при проведении геохимических работ по потокам рассеяния масштаба 1:200 000 только аллювия водотоков I порядка с последующим оконтуриванием геохимических ореолов по способу Г.И. Хорина определяются достоверностью оценки и непрерывностью наблюдений распределения содержаний элементов в коренном субстрате, надежностью выделения РС, наглядностью и компактностью отображения геохимической информации и информативностью при дальнейших прогнозных построениях.

Достоверность обеспечивается использованием точек опробования аллювия только водотоков I порядка, наиболее объективно характеризующих уровень содержаний элементов в коренных породах.

Непрерывность достигается путем трансформации содержаний в процессе оконтуривания аномалий методом интерполяции в существующие промежутки между геохимически охарактеризованными бассейнами водосбора, а также на отдельные участки, частично перекрытые аллохтонными отложениями.

Надежность определяется высокой и достаточной вероятностью выделения РС рангов, соответствующих масштабу проводимых поисков по потокам рассеяния.

Наглядность предполагает возможность отображения геохимической информации в удобной для восприятия форме, легко сопоставимой с геологическими, геофизическими и другими материалами.

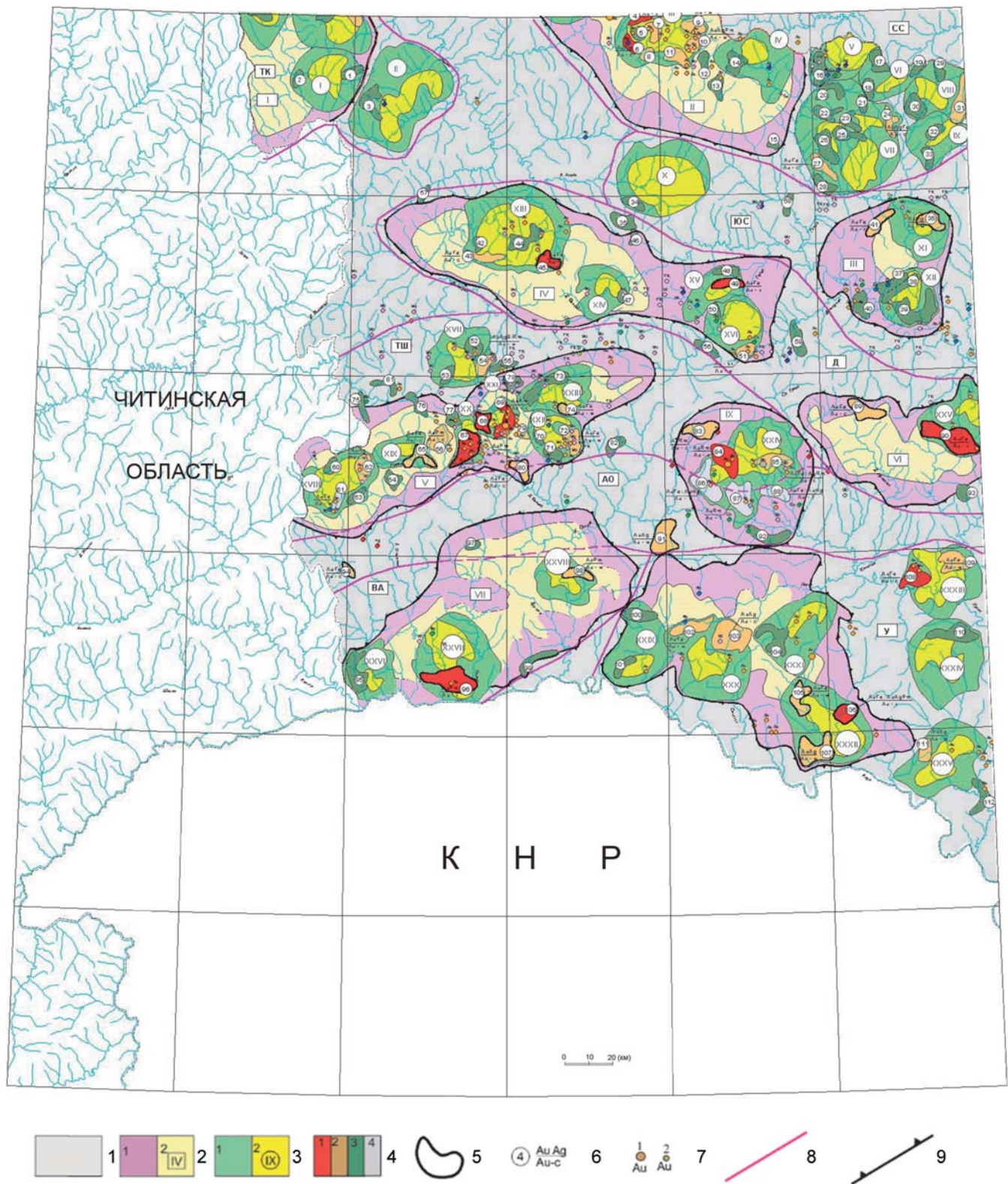


Рис. 4. Прогнозно-геохимическая карта центральной и восточной части листа N-51 (потоки рассеяния): 1 — нормальное геохимическое поле; 2 — строение АГХП ранга рудного района (их номера): 1) зона обмена, 2) ядерная зона; 3 — строение АГХП ранга рудного узла (их номера): 1) зона обмена, 2) ядерная зона; 4 — АГХП ранга рудного поля (их номера), их перспективность на золото: 1) высокоперспективные, 2) перспективные, 3) слабо перспективные, 4) неясной перспективы; 5 — контуры высокоперспективных и перспективных АГХП, соответствующих прогнозируемым, по геохимическим данным, золоторудным полям; 6 — в числителе: прогнозируемая рудно-формационная специализация; в знаменателе: масштаб ресурсов. Рудно-формационная специализация: AuAg — золотосеребряная, AuAgPt — золотополиметаллическая, AuFe — золотокварцевая (пиритовый тип), Au-sk — золотоскарновая, AuAgBiRm — золоторедкометаллическая, AuHg — золотортутная. Масштаб ресурсов: к — крупные (>100 у.е.), с — средние (10–100 у.е.), м — малые (1–10 у.е.); 7 — проявления полезных ископаемых: 1) месторождения, 2) рудопроявления; 8–9 — границы: 8 — структурно-геохимических (минерагенических) зон: СС — Северо-Становая, ТК — Тунги́ро-Каларская, ЮС — Южно-Становая, Д — Джелтулакская, ТШ — Тунги́ро-Шилкинская, АО — Амуро-Охотская, У — Умлеканская, ВА — Верхне-Амурская; 9 — аномальных геохимических полей ранга рудного района

Компактность достигается отображением, при необходимости, в полном объеме результатов литохимических съемок масштаба 1:200 000 на картах масштаба 1:500 000.

Информативность обеспечивается более широким, по сравнению с традиционными способами, диапазоном прогнозных построений при высокой их надежности, в частности, при геометризации РС, анализе рудноформационной принадлежности источников аномальных потоков, изучении зональности, оценке масштабности процессов рудоконцентрации.

Важно и то, что применение технологии опробования аллювия водотоков I порядка с последующим использованием новых методических подходов при интерпретации геохимических данных позволяет перейти от прогноза РУ к прогнозу РП, и, как свидетельствует практика, локализовать изучаемые площади для дальнейших поисков на уровне 5–15 %. Исходя из опыта проведения ГХР по потокам рассеяния во ВСЕГЕИ, Александровской экспедиции, ЦГЭ СВ-ТГУ и других организациях, применение рассматриваемой схемы пробоотбора с опробованием только аллювия водотоков I порядка, исключая неинформативные водотоки более высоких порядков, приводит к уменьшению плотности опробования в сравнении с инструктивной в 3–6 раз и, как следствие, к позитивному прогнозно-поисковому и экономическому эффекту.

Все это позволяет рекомендовать рассматриваемые схему пробоотбора и способ отображения геохимических полей в изолиниях к широкому внедрению в практику проведения геохимических съемок по потокам рассеяния масштаба 1:200 000 и при создании геохимических основ по ретроспективным материалам.

Принципиально аналогичная схема пробоотбора может применяться при литохимической съемке по потокам рассеяния масштаба 1:1 000 000 в открытых районах с расчлененным рельефом путем опробования донных осадков устьевых частей водотоков преимущественно III порядка с бассейнами водосбора, соответствующими масштабу проводимых геохимических работ, в данном случае приблизительно 100 км². Такая схема опробования водотоков ранее использовалась при геохимических поисках месторождений урана с опробованием стока малых рек, применяется в настоящее время при производстве многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:1 000 000 (МГХК-1000). Примером эффективного применения опробования водотоков с дренажными бассейнами площадью около 100 км², которые выбирались в качестве типичных и наиболее представительных для бассейнов площадью около 1000 км² каждый, является реализация международного регионального геохимического проекта «Экобаренц» [14].

Таким образом, предлагается следующее:

— оптимизация сетей геохимического опробования для их приведения в соответствие с рангами основных объектов прогноза и поисков, с допустимым снижением

плотности сетей до 1–2 проб на 1 см² карты заданного масштаба;

— переход от полуколичественных к количественным методам анализа проб;

— исключение из опробования неинформативных, вносящих «шум» в прогнозно-поисковые построения, объектов — аллювия водотоков высоких порядков.

Это позволит существенно уменьшить трудозатраты на пробоотбор, с минимальными потерями перейти от полуколичественных к количественным аналитическим методам, реализовать в полной мере возможности региональных геохимических поисков по потокам рассеяния масштабов 1:1 000 000–1:200 000 с выделением по их результатам потенциальных РУ и РП и, как следствие, повысить надежность прогноза рудогенных систем, соответствующих масштабу работ, достоверность оценок их рудноформационной принадлежности, минерагенического потенциала или прогнозных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Винокуров, И.П.* Типоморфные элементы погребенных россыпей и перекрывающих их кайнозойских отложений / И.П. Винокуров, А.Н. Габышев // Геохимические критерии прогноза и оценки месторождений. — М.: Наука, 1988. — С. 106–112.
2. *Временные методические указания по проведению геохимических поисков на закрытых и полузакрытых территориях* / С.В. Соколов, А.Г. Марченко, С.С. Шевченко и др. — СПб: ВСЕГЕИ, 2005. — 98 с.
3. *Григорьев, С.А.* Прикладные аспекты структурного метода поисков по геохимическим данным / С.А. Григорьев // Теория и практика геохимических поисков в современных условиях. — М.: Наука, 1990. — С. 68–79.
4. *Дэвис, Дж.* Статистический анализ данных в геологии. Кн. 2. / С. Дж. Дэвис. — М.: Недра, 1990. — 427 с.
5. *Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений*. — М.: Недра, 1983. — 191 с.
6. *Марченко, А.Г.* Математические модели литохимических потоков рассеяния как основа их количественной интерпретации / А.Г. Марченко // Геохимические методы и научно-технический прогресс в геологическом изучении недр. — М.: Наука, 1989. — С. 150–160.
7. *Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по вторичным ореолам рассеяния* / Г.И. Хорин, Л.Н. Бельчанская, В.П. Бородин и др. — М.: ИМГРЭ, 1993. — 191 с.
8. *Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по потокам рассеяния* / Г.И. Хорин, В.П. Бородин, А.А. Матвеев. — М.: ИМГРЭ, 1992. — 164 с.
9. *Питулько, В.М.* Основы интерпретации данных поисковой геохимии / В.М. Питулько, И.Н. Крицук. — Л.: Недра, 1990. — 336 с.
10. *Соколов, С.В.* Структуры аномальных геохимических полей и прогноз оруденения / С.В. Соколов. — СПб: Наука, 1998. — 154 с.
11. *Соловов, А.П.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых / А.П. Соловов. — М.: Недра, 1985. — 294 с.
12. *Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых*. / А.П. Соловов, Ф.Я. Архипов, В.А. Бугров и др. — М.: Недра, 1990. — 335 с.
13. *Хорин, Г.И.* Карты геохимических аномалий и полей и геохимическая основа карт прогноза по данным региональных литохимических съемок по потокам рассеяния / Г.И. Хорин, И.Ф. Бровчук, В.П. Бородин // Принципы и методы составления геохимических карт. — Владивосток, 1981.
14. *Geochemical atlas of the Eastern Barents Region*. // R. Salminen, V. Chekushin, M. Tenhola et al. — Elsevier, 2004. — 548 p.
15. *Xie, X.* Multi-scale geochemical mapping in China / X. Xie, X. Wang, Q. Zhang et al. // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. — 2008. — Vol. 8. — pp. 333–341.

© Соколов С.В., Марченко А.Г., 2019

Соколов Сергей Валерьевич // Sergey_Sokolov@vsegei.ru
Марченко Алексей Григорьевич // a-marchenko@yandex.ru