

Лазарев Ф.Д., Маджара А.В., Старостин В.К.
(Норильский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

*Путем анализа литературных источников с использованием фактического материала построена модель затухания гамма-излучения над земной поверхностью. Обоснована целесообразность проведения АГСМ-съемок на высотах 70–90 м, являющихся оптимальными для площадей со спокойным рельефом. Увеличение высоты до 120 м возможно в условиях горного рельефа, а также в случае комплексирования АГСМ с другими геофизическими методами. Отмечается, что Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке, утвержденная в 1977 г., устарела, поэтому назрела необходимость в разработке современной инструктивной документации и принятие актуальной специальной терминологии. **Ключевые слова:** оптимальная высота полета, АГСМ, межмаршрутное расстояние, масштаб съемки, интенсивность гамма-излучения, аномалия, геологический объект.*

Lazarev F.D., Madzhara A.V., Starostin V.K. (Norilsk branch of VSEGEI)

TO THE ISSUE OF CHOOSING THE OPTIMAL ALTITUDE OF AN AIRCRAFT FLIGHT DURING OF AIRBORNE GAMMA-SPECTROMETRIC SURVEY

*A model of attenuation of gamma-radiation above the earth's surface has been constructed by analyzing the literature sources and by using the actual material. The altitude of the AGSM survey at a low relief is substantiated at 70–90 meters. Increase of the survey altitude up to 120 meters is possible in conditions of mountain relief, and also in case of integration of AGSM with other geophysical methods. The technical instruction of airborne gamma-spectrometric survey, was approved in 1977, is obsolete, so there is an urgent need for the development of modern instructional documentation and the adoption of relevant special terminology. **Keywords:** optimal flight altitude, AGSM, line spacing, scale of survey, gamma-ray intensity, anomaly, geological feature.*

Современный геологоразведочный процесс включает в себя, как правило, комплекс аэрогеофизических методов, одним из которых является аэрогамма-спектрометрия (АГСМ). Если на первом этапе развития этот метод был ориентирован только на поиски радиоактивного сырья, то в настоящее время он широко применяется для поисков других (нерадиоактивных)

видов полезных ископаемых (редкие, цветные и благородные металлы, алмазы), а также с целью создания геофизических основ при геологических съемках, выполняемых по государственным программам. Высокая эффективность АГСМ-съемки, особенно в комплексе с другими аэрогеофизическими методами, подтверждена многолетней практикой.

Повышение точности измерений параметров геологической среды и создание модели, адекватно отражающей особенности ее строения, — таковы основные задачи, решаемые геофизическими методами в рамках общего геологоразведочного процесса. Не касаясь анализа всего разнообразия факторов, мешающих точному дистанционному измерению содержания радиоактивных элементов изучаемой территории и понижающих эффективность АГСМ-съемки, в данной статье мы рассматриваем только один из них, но наиболее существенный, а именно — высоту полета воздушного судна, на которой осуществляются измерения.

Цель данной работы состоит в том, чтобы предложить варианты решений актуальных практических проблем АГСМ-метода и, главное, привлечь к процессу решения проблем заинтересованных в деле специалистов (геологов и геофизиков), заострив их внимание на необходимости закрепить результаты выполненного анализа в инструктивно-методических материалах. Именно от методически-нормативного закрепления решений актуальных задач во многом зависит качество полевого материала, геологическая результативность и достоверность прогнозных выводов и эффективность исследований.

Проблема выбора оптимальной высоты полета воздушного судна возникла фактически одновременно с практикой применения метода. Было установлено, что высота полета существенно влияет на достоверность измерений естественной радиоактивности геологической среды в связи с поглощением и рассеянием гамма-квантов в воздухе. Поэтому, исходя из теоретических представлений и результатов анализа опытно-методических исследований, вопрос о высоте производства аэроаэрометрических, а в дальнейшем, аэрогамма-спектрометрических съемок активно обсуждался в литературе со второй половины 1940-х годов, что обусловлено наличием проблемы наращивания запасов уранового сырья и, как следствие, бурным развитием радиоактивных методов поисков.

В этот период, по мере накопления экспериментальных данных, появилось много публикаций, рассматривающих как вопросы распространения гамма-квантов в природных средах, так и практические вопросы, касающиеся эффективности поисковой сети, методики полевых наблюдений и, в частности, оптимальной высоты полета при проведении аэроаэрометрических съемок [5, 7, 8, 9].

Вторая половина 1960-х и 1970-е годы характеризуются широким внедрением АГСМ-съемки в практику поисковых работ. Влияние высоты полета на качество работ в это время продолжают обсуждать, но вопрос представляется уже не столь актуальным, как на первом этапе. Число работ на эту тему постепенно убывает и сходит к минимуму, к редким публикациям, обсуждающим уже не собственно высоту полета, а проблеме приведения, т.е. процедуру преобразования (пересчета) радио-геохимических измерений (на какой бы высоте они не проводились) к нулевому уровню, т.е. к земной поверхности. В дальнейшем процедура приведения становится автоматической и включается в комплекс задач, решаемых измерительной аппаратурой в процессе съемочных работ.

Таков путь, каким аэрогеофизики пришли к представлению об оптимальной высоте полетов АГСМ-съемок, а именно: исследования должны производиться на минимально допустимых высотах от 25–50 м; максимальная высота не должна превышать 75 м; в горах диапазон рабочих высот может составлять 100–130 м. Этот результат был зафиксирован в «Технической инструкции по аэрогамма-спектрометрической съемке» издания 1977 г. [10].

В последующие годы, вплоть до настоящего времени, среди отечественных геофизиков отмечается уменьшение интереса к оценке влияния высоты съемки на качество ее материалов. В 1980–1990-х годах публикации на эту тему становятся редкостью и постепенно сходят на нет. В то же время интерес зарубежных исследователей к этой проблеме не затухает: аппаратура активно совершенствуется, теоретические представления углубляются и, что особенно важно отметить, не прекращаются опытно-методические работы, призванные адаптировать новую аппаратуру к условиям съемки и совершенствовать методику самой съемки. Однако отечественные геофизики сосредотачивают основное внимание на не менее важной проблеме совершенствования математического аппарата процедуры приведения и технических способах ее реализации в процессе съемки с введением поправок за вариации остаточного фона, изменение температуры, давления и пр.

Кроме того, практика производства работ ведущими компаниями многих стран мира также убедительно показала, что АГСМ-исследования нельзя рассматривать как прямой метод поисков, приводящий непосредственно к открытию месторождений урана и других полезных ископаемых. Основная задача метода — выявление перспективных площадей — решается систематической съемкой, которая, в зависимости от цели работ, может быть региональной или детальной и может производиться на различных высотах. Так, например, в работе [9] приводится информация о проведении аэrorадиометрической съемки в конце 1950-х годов. В зависимости от физико-географических условий на высоте до 150 м при межмаршрутных расстояниях до 500 м (масштаб 1:500 000) осуществлялась региональная аэрогеофизическая съемка с целью выявления рудоносных ураносодержащих осадочных формаций.

Результаты этой съемки послужили исходным материалом для детальных аэрогеофизических исследований, проводимых уже на высоте до 60–80 м, а в ряде случаев и до 15–30 м, со сгущением маршрутной сети до 80 м, что соответствует масштабу 1:8 000. Как видим, уже тогда, на заре становления аэрогеофизических работ было отмечено, что поиски полезных ископаемых целесообразно выполнять на малых высотах.

В дальнейшем, по мере совершенствования аппаратной базы, идея о производстве и получении кондиционных данных аэрогамма-спектрометрических съемок на высотах, отличающихся от рекомендуемых инструкцией 1977 г. в большую сторону, продолжала развиваться. Для понимания проблемы отметим, что безопасность съемочных полетов на высотах более 100 м гораздо выше, чем на 25–75 м с обтеканием рельефа. Именно этот фактор являлся определяющим на развитие технологий АГСМ — съемок на больших высотах. В связи с этим закономерно появление как зарубежных, так и отечественных публикаций, доказывающих возможность производства кондиционной съемки на высотах от 100 м и более. Однако окончательно этот вопрос в обществе российских геофизиков до сих пор не решен. Оптимальная высота съемки в настоящее время — предмет дискуссий, мнений, нередко категоричных, но не всегда достаточно обоснованных. Одна группа исследователей доказывает, что высота съемочных полетов должна находиться в диапазоне 50–75 м, другие настаивают на возможности полетов на высотах 120–150 м и даже 250–350 м [1, 11]. Такой широкий разброс мнений о высоте съемки, существенно влияющий на точность измерений, обуславливает необходимость разобраться в этом вопросе, обосновать (определить) и конструктивно закрепить оптимальный диапазон высоты съемочных полетов, поскольку от этого зависит качество полевого материала, результативность и достоверность прогнозных выводов, а также эффективность исследований в целом.

Инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке 1977 г. указывает: «Наибольшая эффективность АГСМ достигается при выполнении полетов на возможно низких высотах и по возможно густой сети маршрутов. Выполнение этих условий ограничивается степенью расчленения рельефа, геологическими и экономическими факторами. Отсутствие априорных сведений о размерах искомых объектов в большинстве случаев не позволяет строго обосновывать густоту маршрутов. Она определяется целевым назначением работ и экономическими факторами. Высота полета, по данным теоретических и экспериментальных исследований, практически не связана с масштабом поисковой (съемочной) сети. Снижение высоты до предельно допустимой (25 м) расширяет возможность обнаружения аномалий, лежащих в стороне от маршрута, а также аномалий слабых по интенсивности и малых по площади...» [10].

Совершенствование аппаратуры, практика ее применения и развитие теоретических представлений о мето-

де в целом способствовали выработке инструктивных технических норм АГСМ-съемки на уровне МАГАТЭ, где также затронута проблема высоты ее производства. Так, например, в рекомендациях 1991 г. [12] на одном из объектов предписывалось выполнять комплексную (аэромагнитную и аэрогамма-спектрометрическую) съемку на высоте 120 м над земной поверхностью, причем диапазон изменения высоты не должен превышать ± 20 м. Несоблюдение этого условия требовало повторного облета территории по тем же маршрутам со строгим соблюдением указанных ограничений.

Отсюда видно, что при выборе оптимальной высоты полета при АГСМ-съемке возникает ряд существенных для ее качественного производства вопросов. С одной стороны, высота, на которой осуществляются измерения, не связана с межмаршрутным расстоянием, а с другой, снижение высоты полета позволяет увеличить детальность съемки и зарегистрировать слабоинтенсивные и небольшие по площади аномалии. Однако с ростом высоты полета, возрастает и сектор «обзора» исследуемой территории, что позволяет увеличить расстояние между линиями маршрутов; но в то же время возрастает также и расстояние до геологических объектов, особенно располагающихся в стороне от маршрута, а количество информации, получаемой в результате съемки, убывает. Возникает важный вопрос: до какого уровня возможно увеличение высоты полета, позволяющей уверенно регистрировать гамма-излучение горных пород по линии маршрута? Или же, формулируя иначе: каким образом можно достичь регистрации максимального количества радиогеохимических аномалий по линии маршрута, независимо от их площадных размеров, принимая во внимание тот факт, что с увеличением высоты съемки интенсивность гамма-излучения затухает?

И, наконец, еще один вопрос, затронутый в «Инструкции...» 1977 г. и касающийся так называемого угла «обзора»: какова связь высоты полета с углом «обзора» гамма-спектрометра? От этой связи (с теоретических позиций) зависит ширина исследуемой полосы вдоль маршрута. Данный вопрос чаще других выносится на обсуждение при обосновании АГСМ-съемок на больших высотах — на уровне 150 м над рельефом и выше. Однако, как будет показано ниже, вопрос этот не столь однозначно решается, как может показаться на первый взгляд.

Напомним, метод гамма-спектрометрии основан на использовании того факта, что интенсивность излучения любого радиоактивного элемента прямо пропорциональна его содержанию в веществе. Поскольку испускаемые атомными ядрами гамма-кванты обладают дискретным линейчатым спектром, причем у каждого изотопа свой характерный спектр, то изучение спектров позволяет точно определить тип радионуклида, а интенсивность излучения — его концентрацию.

Основными радиоактивными элементами земной коры являются ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U и их дочерние элементы. Только радиоактивные ряды калия, урана и тория имеют радиоизотопы, излучающие высокоэнер-

гетические гамма-лучи достаточной энергии и интенсивности, измеряемые гамма-спектрометрией. В процессе регистрации гамма-излучения используются монохроматические линии нуклидов ^{214}Bi (1,76 и иногда 1,12 МэВ), ^{208}Tl (2,62 МэВ) и ^{40}K (1,46 МэВ).

Источниками гамма-излучения являются также процессы в космическом пространстве. Космические гамма-лучи приходят от пульсаров, радиогалактик, квазаров, сверхновых звезд. Гамма-излучение высокой энергии и элементарные частицы космического происхождения взаимодействуют с атомами и молекулами в верхней атмосфере и образуют сложное вторичное излучение. Это вторичное излучение взаимодействует с окружающим веществом, создавая «космическое» фоновое гамма-излучение. В практике АГСМ-измерений излучение, не образованное горными породами, обычно рассматривается как «остаточный фон» и удаляется во время обработки данных. К фоновому излучению также относятся эффекты от атмосферного радона и оборудования.

При прохождении через вещество спектр гамма-излучения деформируется вследствие взаимодействия гамма-квантов с атомами среды. Преобладающим процессом такого взаимодействия гамма-квантов с горной породой и воздухом является комптоновское рассеяние, при котором гамма-квант изменяет направление своего движения и теряет часть энергии, тем большую, чем больше угол отклонения. Вероятность рассеяния на больших углах возрастает для гамма-квантов малой энергии. Многократное комптоновское рассеяние продолжается в веществе до энергий квантов 150–50 кэВ и затем завершается фотоэффектом. Таким образом, интенсивность каждой спектральной линии гамма-излучения уменьшается главным образом за счет рассеяния гамма-квантов, образующих сплошной непрерывный спектр от линии в сторону малых энергий.

В работе [2] представлены результаты расчетов распределения гамма-квантов U, Th и K в приземной атмосфере по энергиям для условий однородного полупространства и показано, что интенсивность рассеянных гамма-квантов возрастает в низкоэнергетической области. Линии спектра с энергией менее 1,0 МэВ неуверенно выделяются на фоне рассеянных квантов уже на высоте 50 м, именно поэтому в АГСМ-методе эта область энергий не используется. В этой же работе отмечено, что используемые в АГСМ-методе спектральные линии уверенно выделяются на фоне рассеянных гамма-квантов до высоты 150 м и, вероятно, немного выше.

Также по представленным данным можно проследить, что с увеличением высоты происходит уменьшение интенсивности гамма-излучения. Для основных энергетических линий U (1.12 и 1.76 МэВ), Th (2.62 МэВ) и K (1.46 МэВ) на высоте 52 м происходит ослабление интенсивности в среднем в два раза, на высоте 105 м — примерно в три раза, а на высоте 157 м — в пять раз.

В работе [4] указывается, что увеличение высоты полета выше 75 м при исследованиях естественной радио-

Таблица 1
Плотность потока гамма-квантов в зависимости от высоты полета, квант/(см² в мин)

Радиоэлемент, его концентрация, энергия линии E(0), МэВ	Высота полета, м			
	1	25	50	100
	Плотность потока гамма-квантов, квант/(см ² в мин)			
Th, 0.0001 %, 2.62	1.14	0.78	0.59	0.38
U, 0.0001 %, 1.76	1.71	1.08	0.79	0.46
K, 1 %, 1.46	20.20	12.4	8.80	5.00

активности нежелательно, т.к. с высотой гамма-поле заметно ослабляется, что влечет быстрое возрастание погрешностей его измерений, особенно из-за роста помех со стороны гамма-излучения продуктов распада радона. В подтверждение приводятся результаты расчета плотности потока гамма-излучения над однородным полупространством для ряда естественных радиоактивных элементов в зависимости от высоты полета (табл. 1).

На основании представленных расчетов видно, что при данной концентрации тория плотность потока гамма-квантов на высоте 1 м составит 1.14 квант/(см² в мин). На высоте 50 м этот параметр уменьшится до 0.59 квант/(см² в мин), т.е. интенсивность потока ослабнет почти в 2 раза, а на высоте 100 м — в 3 раза. В целом для всех трех радиоактивных элементов плотность потока на высоте 50 м составляет 45–50 %, а на высоте 100 м — 25–30 % от плотности потока у поверхности земли.

Однако в практике АГСМ-измерений имеется множество факторов, влияющих на интенсивность гамма-поля, в первую очередь эффект рассеяния гамма-излучения, а также геометрия источника излучения, интенсивность космического излучения, инверсия радона, давление, температура, влажность и пр. Поэтому характер затухания гамма-поля с высотой отличается от расчетного. Пример такого затухания представлен в табл. 2 по результатам наблюдений, выполненных авторами в разные годы с помощью аэрогамма-спектрометра ГСА-2000 с объемом детектора 36,5 литра, в различных регионах России, в т.ч. на Енисейском кряже (2008 г.), в Магаданской обл. (2010 г.), в Бурятии (2013 г.) и Карелии (2015 г.).

Как теоретически, так и на практике максимальный уровень гамма-излучения

регистрируется у поверхности земли, снижаясь по мере увеличения высоты, стремясь к нулевым значениям на высоте 800 м (рис. 1).

На минимально допустимой по безопасности полетов высоте (25 м) интенсивность гамма-излучения сохраняется на уровне чуть более 80 % от максимального, именно поэтому такая высота съемки была законодательно определена технической инструкцией по АГСМ-съемке 1977 г. Согласно ее требованиям, АГСМ-съемка на высоте более 75 м признавалась некондиционной [10], несмотря на то что на этой высоте интенсивность гамма-излучения снижается лишь до 60–56 % от максимального уровня. Такое ограничение обусловлено несовершенством аэрогамма-спектрометров в то время.

На высоте 120 м интенсивность гамма-излучения становится еще меньше — всего 41 % от начального его уровня у поверхности земли. В работе [13] отмечается, что при регистрации радиоактивных элементов в интервале высот до 120 м с применением современной аппаратуры, гамма-спектрометрические измерения наиболее точны и достоверны. Однако в ней (в работе) не указывается какая чувствительность детектора должна быть, чтобы получаемые данные соответствовали условиям. На высоте 150 м над поверхностью земли поток гамма-излучения снижается до 33 %, а на высоте 200 м — до 23 % от начального уровня.

Таблица 2
Результаты разновысотных АГСМ-измерений над однородными площадками

Высота h, м	Средняя скорость счета в общем канале, имп/сек					Гамма-излучение от земной поверхности, %					
	2008	2010	2013	2013	2015	2008	2010	2013	2013	2015	Среднее
0	2514	3444	1631	1539	4333	100	100	100	100	100	100
10	2322	3204	1532	1431	4023	92	93	94	93	93	93
20	2136	2982	1438	1350	3733	85	87	88	88	86	87
30	1980	2772	1375	1250	3468	79	80	84	81	80	81
40	1836	2559	1263	1144	3226	73	74	77	74	74	75
50	1680	2400	1185	1048	2985	67	70	73	68	69	69
60	1566	2289	1103	975	2845	62	66	68	63	66	65
70	1440	2076	1040	888	2568	57	60	64	58	59	60
80	1308	1955	986	821	2384	52	57	60	53	55	56
90	1230	1794	927	754	2215	49	52	57	49	51	52
100	1128	1668	853	703	1996	45	48	52	46	46	47
110	1050	1560	816	660	1907	42	45	50	43	44	45
120	962	1415	754	616	1716	38	41	46	40	40	41
130	882	1350	718	566	1643	35	39	44	37	38	39
140	830	1250	679	520	1544	33	36	42	34	36	36
150	756	1164	639	482	1413	30	34	39	31	33	33
160	713	1098	603	465	1317	28	32	37	30	30	32
170	648	1014	572	433	1218	26	29	35	28	28	29
180	590	942	533	398	1148	23	27	33	26	26	27
190	546	876	505	360	1048	22	25	31	23	24	25
200	495	794	459	342	972	20	23	28	22	22	23
210	468	762	432	302	903	19	22	27	20	21	22
220	438	728	396	284	840	17	21	24	18	19	20

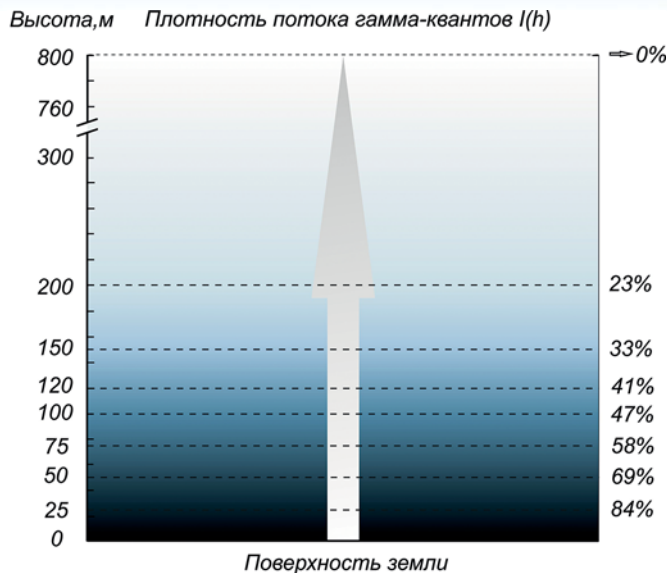


Рис. 1. Фактическая модель гамма-излучения от земной поверхности

Уровень флюктуаций с увеличением высоты растет в геометрической прогрессии, при этом соотношение сигнал/шум снижается и становится предельно низким на высотах более 120 м, что вызывает затруднение при выделении полезного сигнала. Из этого следует, что высота 120 м является пределом измерения АГСМ-метода в части качества и достоверности получаемых результатов. Все измерения, производимые на высоте более 120 м, являются низко информативными даже при современном аппаратном и техническом развитии АГСМ-метода.

Следующий немаловажный вопрос выбора оптимальной высоты полета при АГСМ- съемке тесным образом связан с возможностью уверенной регистрации интенсивности гамма-поля от различных по площади источников излучения, а также со степенью ослабления интенсивности гамма-поля в верхнем полупространстве.

В 1956 г. Г.С. Смирнов [8] отмечал, что обусловленная радиоактивными породами интенсивность гамма-поля изменяется в зависимости от высоты полета и площади их выхода на дневную поверхность. В качестве иллюстрации этого положения приведены графические изображения расчетных данных, которые показывают очень быстрое затухание гамма-поля с высотой для радиоактивных рудопоявлений с небольшими площадными размерами. Например, интенсивность гамма-излучения от точечных источников ($S < 0.0001 \text{ км}^2$ или радиус аномалии $R < 6 \text{ м}$) уже на высоте 10 м ослабнет в 10 раз, а с высоты 50 м его практически невозможно будет зафиксировать.

Над локальными рудопоявлениями ($S < 0.0012 \text{ км}^2$, $R < 20 \text{ м}$) также происходит быстрое затухание поля с высотой, на высоте 50 м интенсивность составляет всего 5 %.

Для площадных аномалий с несколько большими размерами ($S > 0.02 \text{ км}^2$, $R > 80 \text{ м}$) интенсивность гамма-поля на высотах до 50 м составляет порядка 35 %,

в интервале высот 75–100 м снижается до 20 и 15 % соответственно, а выше 100 м — снижается до 10 %. Для широких аномальных зон ($S > 1 \text{ км}^2$, $R > 500 \text{ м}$) интенсивность излучения на высотах от 50 м до 150 м варьирует в диапазоне 25–50 %.

В качестве подтверждения расчетных данных экспериментальными измерениями приводится разрез гамма-поля над участком с размерами 20x60 м и интенсивностью 200 мкР/час, который демонстрирует очень быстрое затухание поля в верхнем полупространстве и при удалении от центра рудного выхода.

Из анализа этих данных следует вывод, что даже с применением современного аэрогамма-спектрометра на высоте полета 100–120 м объект с размерами 20x60 м, обладающий интенсивностью гамма-излучения 200 мкР/час (!) зарегистрировать будет проблематично, поскольку интенсивность на той высоте составит всего лишь 2,0–2,2 мкР/час. Подобные объекты при поисках, а также при геологическом картировании вряд ли найдут свое отражение в наблюдаемых аэрогамма-спектрометрических полях; они, скорее всего, будут пропущены.

В другой работе [7] также указывается на то, что интенсивность гамма-излучения от радиоактивного тела резко убывает с высотой вследствие уменьшения телесного угла облучения (пропорционально квадрату расстояния) и за счет поглощения гамма-излучения воздушной средой. При этом, чем меньше площадь излучающего объекта на дневной поверхности, тем быстрее убывает интенсивность этого излучения с высотой. В подтверждение этому приводятся результаты расчетов, которые показывают, что над аномальным участком площадью 400 м² на высоте около 50 м излучение ослабнет в 50 раз, а на высоте 100 м — в 200 раз.

Аномальные участки площадью первые тысячи квадратных метров будут характеризоваться интенсивностью гамма-радиации, составляющей 5 % на высоте 50 м и 1 % — выше 100 м, что также ставит их в ранг локальных источников, регистрация которых возможна лишь на малых высотах и при их очень высокой интенсивности.

Оценку связи интенсивности гамма-излучения с высотой регистрации и размерами геологических объектов, подлежащих обнаружению, приводит также Л.Н. Вавилин с соавторами в работе [2]. На рис. 2 показано изменение относительной интенсивности гамма-излучения при изменении высоты наблюдения над центром изометрического участка с различным эффективным радиусом R объекта и гауссовым распределением радиоактивного вещества.

Рассмотренный материал показывает, что на высоте 120–150 м обнаружение локальных объектов, площадь которых составляет первые тысячи квадратных метров ($R < 50 \text{ м}$), затруднительно. На этих высотах интенсивность гамма-излучения над такими объектами практически полностью затухает и составляет всего 0,5 % от уровня их излучения на земной поверхности. Наиболее четко будут фиксироваться широкие площадные гамма-аномалии для объектов с размерами в десятки

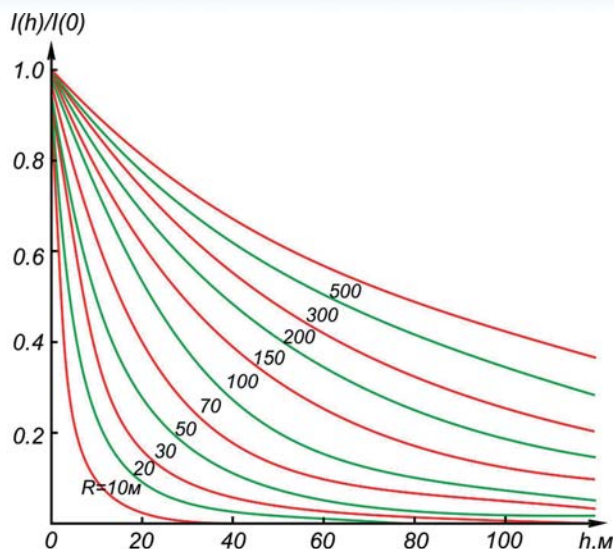


Рис. 2. Изменение относительной интенсивности гамма-излучения при изменении высоты наблюдения (Л.Н. Вавилин и др., 1982)

тысяч квадратных метров ($R > 300$ м) на рабочих высотах 50–120 м, т.к. на таких высотах аномалии сохраняют значительную долю (20–50 %) интенсивности даже при сравнительно низких значениях естественного гамма-излучения этих объектов. Из этого следует вывод, что интенсивность гамма-излучения с увеличением высоты над источниками больших размеров затухает относительно медленно. Для локальных объектов уменьшение потока гамма-квантов с высотой происходит гораздо сильнее. Поэтому вероятность обнаружения локальных объектов с увеличением высоты регистрации снижается.

Итак, анализ результатов изучения нашей проблемы предшественниками подводит нас к ответу на вопрос: как связаны между собою высота полета и размеры подлежащих съемке геологических объектов? Выяснилось, что объекты могут быть либо обнаружены, либо пропущены в зависимости от выбора высоты съемочных работ и размеров их площади. Так, большие объекты, площадь которых исчисляется квадратными километрами, не будут пропущены при съемке на высоте 50–150 м; объекты с меньшими размерами ($R = 100$ –200 м) будут зафиксированы при съемке на высоте 50 м, но будут пропущены на высоте 150 м; для поисков локальных объектов площадью сотни квадратных метров ($R = 10$ –35 м) высота полета должна быть менее 50 м. В связи с этим геофизик-практик нередко оказывается в противоречивом положении, когда надо решить, что лучше: «охватить» съемкой всю площадь, но пропустить малые объекты, или же фиксировать все объекты в полосе шириной $L = 2h$, не охватывая всю площадь. Даже техническое задание не всегда способствует однозначному решению этого противоречия.

При выборе оптимальной высоты полета возникает еще один вопрос, тесно связанный с так называемым углом «обзора» аэрогамма-спектрометра, и требующий четкого ответа. Считается, что угол «обзора» изменяется вместе с изменением высоты полета и опре-

деляет на земной поверхности площадь круга, излучающего гамма-кванты, регистрируемые детектором. При полете по съемочному маршруту на заданной высоте угол «обзора» определяет ширину полосы, которая является оптимальным межмаршрутным расстоянием для измерений на данной высоте.

Вопросы пространственно-угловой анизотропии также начали изучать со времени становления АГСМ-метода. В литературных источниках мы находим упоминания об угле «обзора» спектрометра и ширине исследуемой полосы, которые в зависимости от высоты полета и условий съемки варьируются в широком диапазоне. В некоторых работах [1, 3, 9] встречается упоминание о телесном угле «обзора» 90° – 120° , что в свою очередь определяет ширину полосы исследования равную 2–3 высотам h полета, т.е. $2h$ – $3h$. В других работах [2, 4, 6, 11] упоминается о гораздо большей зоне «обзора» спектрометра, достигающей $7h$ – $8h$, в зависимости от высоты измерения. Так, например, в работе Б. Кука и др. [6] эффективный круг исследования составляет $8h$ на высоте 20 м, $6.5h$ — на высоте 60 м и $5h$ — на высоте 120 м. В работе В.В. Филимонова и П.Н. Фогта [11] отмечено, что при АГСМ съемке на высоте 75 м «просматривается» полоса шириной ± 250 м от линии полета, т.е. зона «обзора» составляет $6.6h$.

Л.Н. Вавилин с соавторами [2] определил понятие зоны «обзора» спектрометра, радиоактивность которой отражают измерения, как ширину полосы $L_{\text{эф}}$ вдоль маршрута, создающей 90 % эффекта от полупространства. При этом на высоте h эффективная относительная интенсивность излучения $I(h)$ будет составлять $0,9I(h)/I(0)$, где $I(0)$ — интенсивность излучения бесконечного источника у поверхности земли. Это определение допустимо, когда аэрогаммасъемка проводится с целью радиогеохимического картирования ($L_{\text{эф}} \gg h$). Для задач локального прогноза это определение мало подходит, указывает автор.

В табл. 3 приведены расчетные данные эффективной ширины полосы вдоль маршрута, зоны «обзора» спектрометра и эффективной относительной интенсивности излучения на различных высотах.

Исходя из этих данных, можно сказать, что зона «обзора» спектрометра ($L_{\text{эф}}/h$) составляет более $7h$ на высоте 20 м и уменьшается до $4h$ на высоте 100 м. При этом, согласно схеме расчетов, в зависимости от высоты полета угол «обзора» детектора изменяется от 150° до 120° (рис. 3).

Таблица 3
Зона «обзора» аэрогамма-спектрометра

Характеристики	Высота полета h , м				
	20	30	50	70	100
Ширина полосы вдоль маршрута $L_{\text{эф}}$, м	150	200	260	320	400
Зона «обзора» аэрогамма-спектрометра $L_{\text{эф}}/h$	7.5	6.7	5.2	4.6	4.0
Относительная интенсивность гамма-излучения $0,9I(h)/I(0)$	0.73	0.68	0.60	0.49	0.40



Рис. 3. Схема расчета угла «обзора» спектрометра в зависимости от высоты полета (по данным Л.Н. Вавилина, 1982)

Автор отмечает, что все эти расчеты относятся к изотропному детектору, в действительности же чувствительность блока детектирования в горизонтальном направлении приблизительно вдвое меньше, чем в вертикальном, поэтому ширина зоны «обзора» несколько меньше значений, приведенных в табл. 3. Тем не менее, эти данные позволяют сделать вывод о том, что зона «обзора» детектора составляет около 3h-5h, что теоретически позволяет с высоты 50 м охватывать межмаршрутное расстояние 250 м, а с высоты 120–150 м зона «обзора» спектрометра будет практически полностью перекрывать полосу шириной 500 м.

Р.М. Коган [4] отмечал, что поле гамма-излучения на высоте h определяется на некоторой площади под летательным аппаратом и основная часть излучения от бесконечно протяженных источников (плоского, полупространства и др.) приходит от круга радиусом R, равным нескольким длинам свободного пробега гамма-квантов. Радиус этого круга, для которого выполняется условие $I(h)/I(0)=0,9$, он называл эффективным радиусом Rэф. Используя зависимости вклада гамма-излучения однородного полупространства от геометрии измерений, им были рассчитаны значения Rэф для гамма-излучения основных радиоактивных элементов Th ($E=2,62$ МэВ), U ($E=1,76$ МэВ) и K ($E=1,46$ МэВ) для различных высот. В табл. 4 представлены расчетные значения ширины полосы вдоль маршрута Lэф и зоны «обзора» гамма-спектрометра.

В данном случае ширина полосы исследования на высоте 50 м составит около 320 м, а это определяет зону «обзора» спектрометра порядка 6,5h, при этом угол «обзора» детектора будет равняться 145° . Автор утверждает, что содержания радиоактивных элементов, полученные при самолетных гамма-спектральных

Таблица 4
Эффективные величины для гамма-излучения Th, U и K

Радио-элемент	Высота h = 25 м			Высота h = 50 м		
	Rэф., м	Lэф., м	Lэф./h	Rэф., м	Lэф., м	Lэф./h
Th	100	200	8.0	170	340	6.8
U	95	190	7.6	160	320	6.4
K	90	180	7.2	155	310	6.2
среднее	95	190	7.6	161,5	323	6.5

измерениях, обладают очень высокой представительностью и детектор, независимо от высоты полета, регистрирует гамма-кванты с углом «обзора» значительно превосходящем 120° . Это утверждение справедливо и для современных спектрометров.

В этой связи был проведен эксперимент с использованием аэрогамма-спектрометра RSX-500. Целью эксперимента являлось определение круговой чув-

ствительности прибора. Перед началом измерений блок детектора разместили вертикально в центре круга радиусом 2,7 м, который был размечен с шагом 10 градусов. В качестве источников ионизационного излучения использованы уран-ториевая и калиевая рудные эталоны. Время накопления на каждой точке составляло 5 минут.

После вычитания фоновых значений в каждой из 36 точек измерения была рассчитана скорость счета импульсов в канале общего счета. Для наглядности расчетные данные представлены в виде круговой диаграммы, где количество зарегистрированных импульсов выражено в процентах от общего количества по всей окружности (рис. 4).

Оказалось, что количество зарегистрированных импульсов в горизонтальном направлении приблизительно вдвое меньше, чем в вертикальном. По-нашему мнению такое различие обусловлено тем, что площадь боковых граней детектора, принимающих гамма-излучение, значительно меньше площади его нижней и верхней граней. Этот эксперимент показал, что гамма-спектрометр принимает гамма-излучение всеми шестью гранями. Из этого следует, что «зона» обзора гамма-спектрометра или ширина исследуемой полосы вдоль маршрута практически не зависит от угла «обзора» прибора.

Следовательно, при АГСМ-съемке, количество принятых импульсов гамма-излучения зависит от расстояния до источника излучения, от интенсивности гамма-излучения и от геометрических размеров этого источника. Эти три фактора необходимо учитывать при выборе оптимальной высоты полета.

Вся представленная выше информация (анализ литературы и результаты экспериментов) позволяет сделать следующие выводы:

Зона «обзора» спектрометра, даже без учета высоты, варьирует в довольно широких пределах — от 2h до 7h, имеющиеся данные о ее ширине весьма противоречивы и однозначного определения ее параметров не существует.

Угол «обзора» также изменяется в довольно широком диапазоне, от 90° до 150° и более градусов. Следовательно, нельзя четко определить эффективную ширину изучаемой полосы вдоль маршрута и лишь на

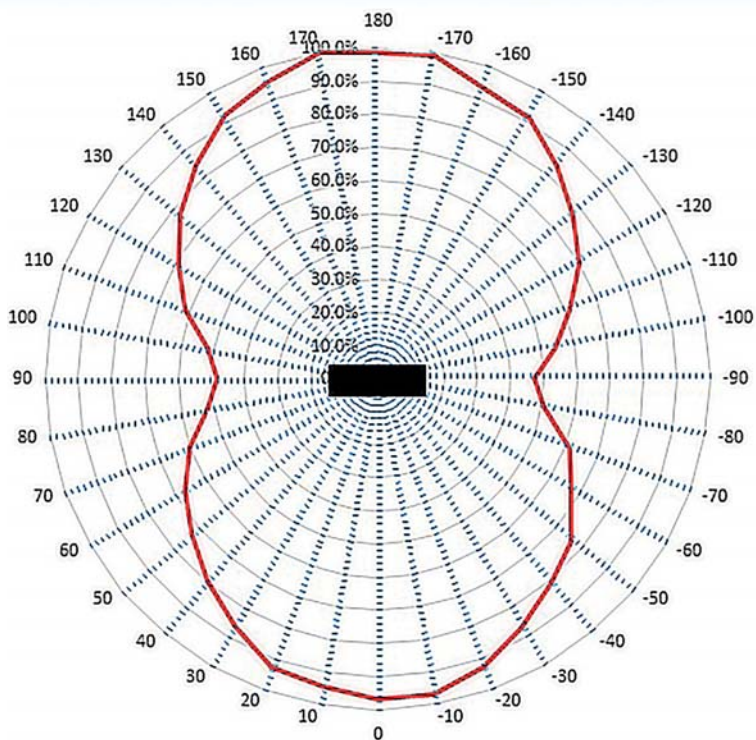


Рис. 4. Диаграмма круговой чувствительности спектрометра RSX-500

этом основании рассуждать об «обзоре» территории исследования.

Более того, само понятие зона «обзора» и угол «обзора», по-нашему мнению, для аэрогамма-спектрометра не приемлемо, поскольку это не фотоаппарат, он ничего не обзорекает, а пассивно принимает гамма-излучение, поступающее на детектор со всех сторон по линии маршрута (снизу, сверху, справа, слева, спереди и сзади). Бесспорным также является то, что с увеличением высоты регистрации, увеличивается площадь сбора гамма-излучения от земной поверхности, а каждая точка регистрации отражает некое усредненное значение гамма-излучения, отличающееся от действительности, и чем выше высота регистрации, тем больше радиус осреднения. Следует помнить, что с увеличением высоты интенсивность гамма-излучения снижается, увеличивается уровень флуктуаций, снижается соотношение «сигнал/шум» и, как следствие, искажение регистрируемого поля становится еще более значимым, что влечет за собой снижение информативности АГСМ-метода.

В подтверждение к вышесказанному приведем материалы АГСМ-съемки одного участка, полученные на двух различных высотах, с применением российского аэрогамма-спектрометра ГСА-2000 с объемом детектора 36,5 л. Облет участка осуществлялся на самолете Ан-3 в один полевой сезон (с интервалом 5–7 дней) последовательно на заданных высотах 50 м и 120 м по одним и тем же маршрутам, ориентированным в меридиональном направлении. Расстояние между маршрутами 250 м, что соответствует масштабу съемки 1:25 000. Средняя фактическая высота полета в первом случае составила 47 м, а во втором — 114 м, т.е. различие по высоте чуть более, чем в два раза.

Обработка полученного материала выполнена с применением программы Oasis Montaj по методике МАГАТЭ. Матрицы данных построены с размерами ячеек 100×100 м. В результате созданы карты содержания естественных радиоактивных элементов и мощности дозы гамма-излучения, последние из них представлены на рис. 5, 6.

Сравнивая распределение мощности экспозиционной дозы (МЭД) на этих рисунках, мы видим высокую степень близости значений, укладываемых в один и тот же диапазон (от 5,3 до 10,9 мкР/час). Это видно невооруженным глазом. Однако при более внимательном рассмотрении в деталях обнаруживаются существенные различия в морфологии этих полей. Поле, полученное на высоте 47 м (рис. 5) имеет контрастный дифференцированный характер с плавным переходом от минимальных значений радиоактивности к максимальным.

Поле, полученное по материалам повторного облета на высоте 114 м (рис. 6), менее дифференцировано, площадь распространения аномальных зон с пониженными значениями значительно расширилась (голубой цвет). Площадные размеры некоторых аномальных зон, имеющих на рис. 6, либо уменьшились в размерах, либо разделились на несколько частей (на рисунке отмечены цифрами 1, 2), а другие исчезли вовсе (выделены кружочками).

Обширные аномальные зоны, примыкающие к северо-восточной границе участка, как на рис. 5, так и на рис. 6 повторяются с «фотографической» точностью, что обусловлено их значительными площадными размерами и повышенной радиоактивностью (аномальные зоны 3, 4, 5). Есть и другие отличия, мы сознательно не стали акцентировать на них внимание и предоставляем читателю самому в этом убедиться.

Поскольку радиометрические поля, регистрируемые на разных высотах (47 м и 114 м), имеют существенные различия, мы утверждаем, что увеличение высоты съемки до 150 м, приведет к еще более значительному искажению результатов измерений и тем самым, существенно снизит качество полевого материала.

Практика показывает, что для современного гамма-спектрометра с объемом датчиков 32 л (типа RSX-500) высота съемки 70–90 м оптимальна для площадей со спокойным рельефом, однако мы допускаем полеты и на больших высотах — до 120 м, что обусловлено возможностью включения дополнительного канала — электроразведки, которая в силу конструктивных особенностей и безопасности полетов не может выполняться на высотах менее 120 м. В данном случае надо выбрать, что лучше: частично потерять гамма-спектрометрическую информацию, но получить электрические характеристики геологической среды, либо отказаться от них ради высокого качества гамма-спектрометрических материалов, пригодных для локального прогноза.

Отсюда следует, что каждый объект аэрогеофизических исследований необходимо рассматривать индивидуально, строго оценивая все «за и против» применения того или иного комплекса методов для его исследования. Например, при поисках золоторудных объектов, приуроченных к черносланцевым толщам, вероятно, оправдано включение в комплекс методов электроразведки и выполнение съемки на высоте 120 м.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ литературных источников, освещающих проблемы аэрогамма-спектрометрических съемок и результаты собственных исследований по этой теме позволяют сделать следующие выводы:

1. Относительная интенсивность гамма-излучения над полупространством с однородной гамма-активностью зависит только от высоты регистрации или иначе — постоянна на одной высоте.

2. Наибольшая интенсивность гамма-излучения наблюдается на высотах первые десятки метров над землей, являющейся наиболее информативной зоной при регистрации.

3. С увеличением высоты съемки информативность АГСМ-метода снижается.

4. Высота АГСМ-съемки никак не связана с расстоянием между маршрутами, т.е. не зависит от масштаба исследований.

5. Интенсивность гамма-излучения с увеличением высоты затухает над источниками больших размеров относительно медленно, но гораздо быстрее над небольшими, локальными объектами. Следовательно, вероятность обнаружения локальных объектов с увеличением высоты регистрации снижается. Поэтому выполнение поисков полезных ископаемых целесообразно осуществлять на предельно малых высотах съёмочных полетов.

6. Высота аэрогамма-спектрометрической съемки в пределах 70–90 м является оптимальной для площадей со спокойным рельефом. Увеличение высоты до 120 м возможно в условиях горного рельефа, а также в случае комплексирования АГСМ-съемки с другими геофизическими методами.

7. Высота 120 м практически является пределом измерения АГСМ-метода в части качества и достоверности получаемых результатов.

И, наконец, последнее. Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке, утвержденная в 1977 г., бесспорно устарела, не соответствует современному уровню применяемой аппаратуры, средствам навигации, авиационным носителям (самолетам и вертолетам). Она также не соответствует современным методикам обработки и интерпретации полевого гамма-спектрометрического материала и пр. Все это обуславливает необходимость разработки инструктивной документации, отражающей современное состояние аэрогамма-спектрометрии, как метода по изучению геологического строения больших территорий и поисков различных видов полезных ископаемых.

Возможно, стоит взять за основу положения «Руководства по картированию радиоактивных элементов с использованием гамма-спектрометрических данных» Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), июль 2003 [13], пропустив их через «призму» российского законодательства, адаптировать к современным российским условиям и утвердить, в том числе и специальную терминологию. Для этого,

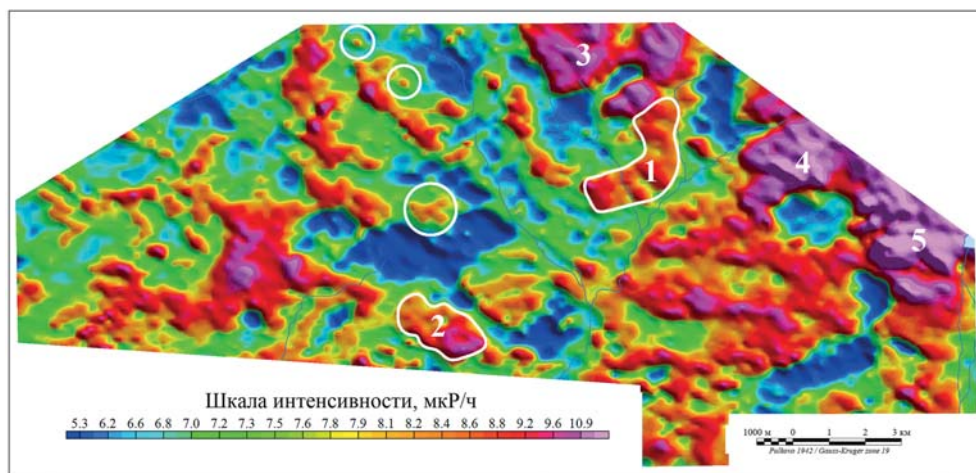


Рис. 5. Мощность экспозиционной дозы, высота съемки 47 м

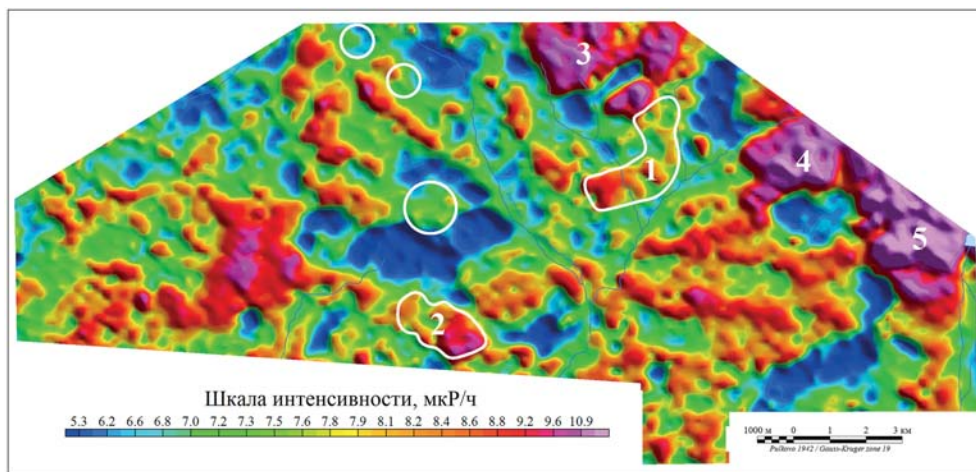


Рис. 6. Мощность экспозиционной дозы, высота съемки 114 м

возможно, потребуется проведение теоретических и экспериментальных исследований. Такую работу следует поручить коллективу, способному на конкурсной основе представить компетентному жюри достойную научно-исследовательскую программу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабаянц, П.С.* Особенности современной аэрогамма-спектрометрии / П.С. Бабаянц, В.М. Керцман // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 12. — С. 10–16.
2. *Вавилин, Л.Н.* Аэрогамма-спектрометрия в геологии / Л.Н. Вавилин, В.П. Воробьев, А.В. Ефимов и др. — Л.: Недра, 1982.
3. *Воробьев, В.П.* Аэрогамма-спектрометрический метод поисков рудных месторождений: метод. руководство / В.П. Воробьев, А.В. Ефимов, М.И. Альтшулер и др. — Л.: Недра, 1977.
4. *Коган, Р.М.* Основы гамма-спектрометрии природных сред. — 3-е изд. / Р.М. Коган, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. *Корчагин, В.И.* Аэрогеофизические методы поисков месторождений редких элементов / В.И. Корчагин и др. // Геология месторождений редких элементов. Вып. 20. — М.: Госгеолтехиздат, 1963.
6. *Кук, Б.* Успехи в калибровке аэрогамма-спектрометров для геохимических поисков / Б. Кук, Дж. Дувал, А.С. Дж. Адамс // Геохимические поиски. Серия Науки о Земле. Т. 55. — М.: Мир, 1973.

7. *Мелков, В.Г.* Поиски месторождений урана / Под ред. Е.М. Янишевского / В.Г. Мелков, Л.Ч. Пухальский. — М.: Госгеолтехиздат, 1957.
8. *Смирнов, Г.С.* Основные вопросы теории и методики аэрогадметрической съемки / Г.С. Смирнов // Матер. VII Всесоюзного межведомственного совещания по аэросъемке. Тр. лаборатории аэрометодов. АН СССР. Том VIII. — 1956. — М.: Госгеолтехиздат, 1959.
9. *Тер-Оганесов, Я.Г.* Методика и техника аэрогеофизических поисков месторождений урана за рубежом / Я.Г. Тер-Оганесов, Т.И. Гвайта, Ю.В. Рошин, В.И. Зубова // Вопросы геологии урана. — М.: Атомиздат, 1957.
10. *Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке.* — М., 1977.
11. *Филимонов, В.В.* Разработка аэрогамма-спектрометра АГС-СВ для выполнения съемок при высоте полета до 350 м. Отчет о научно-исследовательской работе / В.В. Филимонов, П.Н. Фогт. — СПб: ВИРГ-Рудгеофизика, 2000.
12. *Airborne gamma ray spectrometer surveying. Technical report series.* № 323. — International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1991.
13. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data.* — International Atomic Energy Agency (IAEA). Vienna. 2003.

© Лазарев Ф.Д., Маджара А.В., Старостин В.К., 2019

Лазарев Федор Дмитриевич // lazarevfd@yandex.ru
Маджара Андрей Валерьевич // mrmadjara@yandex.ru
Старостин Владимир Карпович // starostinvk@yandex.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.3.01+556.382

Новиков В.П., Копылов Д.В., Черепанова Е.Р. (ФБУ «ТФГИ по УрФО»), Жуковская Е.П. (Уралнедра)

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАПАСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В НАРУШЕННЫХ ВОДООТБОРОМ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ УРАЛЬСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

*Сложившаяся практика оценки обеспеченности подсчитанных эксплуатационных запасов подземных вод (ЭЗПВ) подавляющего большинства малых и средних (до нескольких тысяч м³/сут) месторождений (водозаборных участков) в пределах Уральской гидрогеологической складчатой области (УГСО) базируется на обоснованных тем или иным способом количественных показателях подземного стока и привлечения поверхностных вод транзитных рек (ручьев) в расчетные маловодные периоды. Такой подход не учитывает тесную связь в открытых гидрогеологических структурах подземного и поверхностного стока, что занижает ресурсный потенциал оцениваемых и разведываемых месторождений (участков) и часто действующих водозаборов в 1,5–2,5 и более раз. В статье выполнен анализ количественной оценки участия речного стока в формировании ЭЗПВ объектов водоснабжения УГСО при каптировании подземных вод на всех этапах геологического процесса и даны конкретные рекомендации по уточнению оценки обеспеченности подсчитанных (оцененных) ЭЗПВ, что существенно повысит эффективность этих работ. **Ключевые слова:***

Уральская гидрогеологическая складчатая область, эксплуатационные запасы подземных вод, сокращение речного стока, кора выветривания, коэффициент водоотдачи.

Novikov V.P., Kopylov D.V., Cherepanova E.R. (TFGI on UrFO), Zhukovskaya E.P. (Uralnedra)

THE OPERATIONAL RESERVES OF UNDERGROUND WATER IN IMPAIRED WATER HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE URAL OROGEN

*The current practice of assessing the provision of estimated operational groundwater reserves (EOGR) of the vast majority of small and medium (up to several thousand m³/day) deposits (water intake areas) within the Ural Hydrogeological Folded Region (UHFR) is based on quantitative indicators of underground runoff and attracting surface waters of transit rivers (streams) in the designed low-flow periods. This approach does not take into account the close relationship between the underground and surface runoff in the open hydrogeological structures, which underestimates the resource potential of the estimating and exploring deposits (sites) and often functioning water intakes by 1,5–2,5 or more times. The article analyzes the quantitative assessment of the river runoff's participation in the creation of EOGR of water supply facilities at all stages of the geological process of capturing groundwater and specific recommendations are given to refine the assessment of the provision of estimated EOGR, which will significantly increase the effectiveness of these works. **Keywords:** Ural hydrogeological folded region, operational reserves of groundwater, reduction of river runoff, weathering crust, coefficient of water yield.*