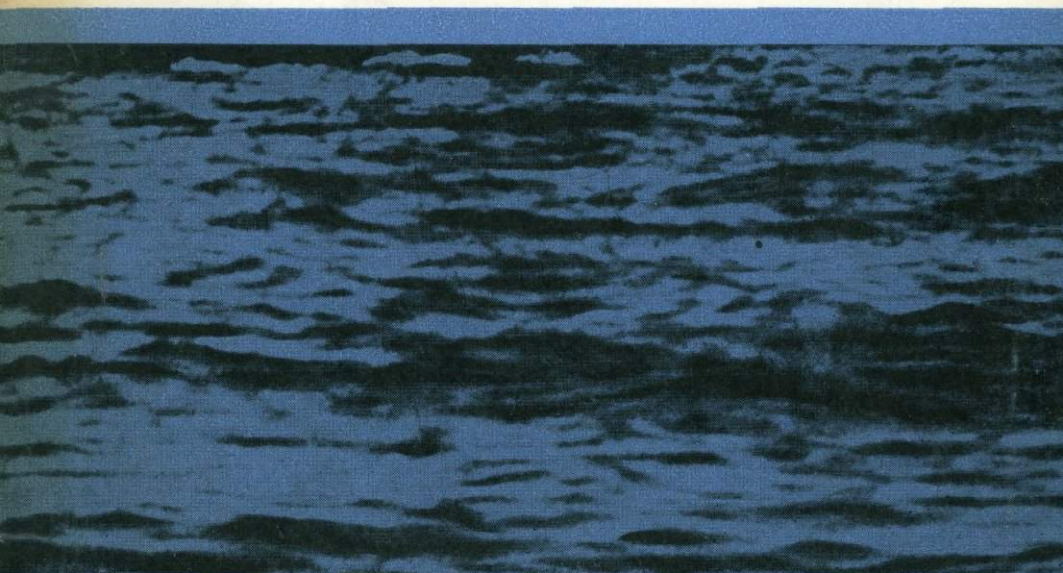


**ГАММАМЕТРИЯ
МОРСКОГО ДНА
ПРИ ПОИСКАХ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**



А. Н. Шацов

ГАММАМЕТРИЯ
МОРСКОГО ДНА
ПРИ ПОИСКАХ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ

2317



Москва «Недра» 1977



Шацов А. Н. Гаммаметрия морского дна при поисках полезных ископаемых. М., «Недра», 1977. 168 с.

В книге рассматриваются основные аспекты изучения естественного гамма-поля при геологических исследованиях морского дна. Освещаются вопросы создания морских сцинтилляционных радиометров для проведения непрерывных (по профилям) и дискретных (по станциям) замеров естественного гамма-излучения поверхностного слоя современных морских осадков и пород морского дна в условиях их естественного залегания. Показано значение гаммаметрии мелководных шельфовых зон Каспийского, Азовского, Балтийского, Черного и Японского морей для изучения геологического строения дна и его минерально-сырьевой базы. Кратко описываются геофизические методы, с которыми следует комплексовать гаммаметрию морского дна.

По данным отечественных и зарубежных исследований показаны перспективы применения спектрометрии естественного, а также наведенного и захватного гамма-излучения для исследования железомарганцевых и фосфоритовых конкреций, впадин морского дна, заполненных высокоминерализованными рассолами и илами.

Книга предназначена для геофизиков и геологов, связанных с работами по изучению морского дна, она может быть полезна учащимся техникумов и студентам вузов геофизических и геологических специальностей.

Табл. 33, ил. 41, список литературы — 122 назв.

Предисловие

За время, прошедшее после выхода в свет «Морской радиометрии» [69], морские ядерно-физические методы претерпели значительное развитие. В основном это касается внедрения в практику морских исследований многоканальных анализаторов и изотопных нейтронных источников, что позволяет вплотную подойти к изучению дистанционными методами элементного состава донных пород и современных морских осадков в условиях их естественного залегания (*in situ*). Четко определились тенденции промышленного освоения подводных месторождений нефти и газа, а также твердого минерального сырья — железомарганцевых конкреций, россыпей фосфоритов, баритов и т. д.

Основной фактический материал по структурно-поисковой тематике, полученный на Каспийском море, изложен в [69]. Исследования эти были продолжены ВНИИЯГГом в 1965—1968 гг. на Азовском море совместно с морскими геофизическими подразделениями треста Днепрогеология. С 1967 г. совместно с Московским горным институтом (МГИ), а затем с ВНИИМОРГЕО (г. Рига) проводятся исследования современных прибрежно-морских титан-циркониевых россыпей Балтийского моря. В 1968 г. совместно с МГИ и Приморским геологическим управлением (ПГУ) начаты работы по изучению побережья Японского моря. В 1970 г. проведены рекогносцировочные работы в южной части шельфа Охотского моря совместно с Дальневосточным геологическим институтом. Полученные от А. А. Емельянова и К. В. Яблокова образцы современной прибрежно-морской касситеритовой россыпи и образцы осадков с северо-восточного побережья о. Сахалин, любезно предоставленные М. А. Шпеталенко, позволили рассмотреть связь естественной радиоактивности с содержанием олова и золота.

Конструирование оболочек подводных датчиков оказалось возможным благодаря расчетам, выполненным В. Ф. Журавлевым, О. И. Котовым и Г. В. Пузыревым. Оптимизация программы, расчеты на ЭВМ и построение теоретических аппаратурных спектров проведены В. А. Степановым под руководством Б. Е. Лухминского. Измерения на двухкристальном спектрометре сделаны В. П. Купцовым. Расчеты по подводному нейтронно-активационному анализу на гафний выполнены

совместно с Д. Ф. Беспаловым, В. И. Воропаевым, Б. Е. Лухминским, Ю. Т. Мартыновым, Р. А. Резвановым, В. А. Степановым, В. В. Сулиным и С. И. Шорниковым при участии К. И. Якубсона. Большая помощь в создании аппаратуры была оказана Г. Р. Гольбеком, А. П. Грумбковым, В. В. Матвеевым, А. Д. Соколовым. Натурные исследования проводились при участии И. И. Алексеевой, Л. С. Германовского, В. С. Евсеева, А. А. Емельянова, В. А. Еремеева, В. К. Ерофеева, М. А. Зениной, В. А. Кузьмичева, В. Ф. Курочкина, Г. Л. Лебедева, О. А. Нечаева, Ю. В. Пейсикова, В. Ф. Попова и других, при содействии и помощи капитанов и команд экспедиционных научных и исследовательских судов.

В настоящее время радиометрические исследования и изучение спектрального состава естественного гамма-излучения современных морских осадков могут рассматриваться лишь как начальная стадия гаммаметрии морского дна. Необходимы создание аппаратурно-методической базы и разработка технических основ проведения подводного элементного анализа современных морских осадков и пород морского дна комплексом ядерно-геофизических методов. Отдавая себе отчет в трудности полного системного обзора современного состояния и перспектив исследования естественного и наведенного гамма-излучения пород морского дна для изучения его геологического строения и минерально-сырьевой базы, автор будет искренне признателен всем, кто выскажет свои замечания по поводу его попытки привлечь внимание к приложению идей и методов прикладной ядерной геофизики к познанию дна Мирового океана. Быстрое развитие изучаемой проблемы и незначительный объем книги привели к тому, что в каждой главе рассмотрены лишь основные, по мнению автора, вопросы.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность Ф. А. Алексею, Г. А. Ахмедову, В. И. Ермакову, В. П. Зенковичу, Е. В. Карусу и В. В. Федьинскому за внимание и поддержку в работе; А. М. Блюменцеву, В. З. Шейн и особенно Ю. Н. Бурмистенко за помощь при подготовке рукописи к печати.

Результаты работ по поднятию Голицына, Азовскому и Японскому морям описаны совместно с А. А. Емельяновым.

Введение

Резко возросшая интенсификация промышленного производства, вызванная ускорением научно-технического прогресса во второй половине нашего века, и значительное истощение близповерхностного наземного минерального сырья обусловили повышенный интерес к изучению минерально-сырьевых ресурсов донных пород и вод и осадков Мирового океана. Проведенные в ряде стран изыскания показали возможность создания новых методов исследований и технических средств для практического решения этой проблемы, возникшей в связи с быстрым ростом минерально-сырьевых потребностей и бурным увеличением энергоемкости промышленности.

Анализ данных по объему добычи полезных ископаемых в мире показывает, что в последнее время удвоение добычи происходит, ориентировочно, в течение каждых 15—18 лет. Для СССР этот период сокращается примерно до 8—10 лет. В настоящее время доля СССР в мировом горном производстве определяется в 22—23% при явно выраженной тенденции к постоянному росту. Доля США за последнее время уменьшилась с 36% в конце пятидесятых годов до 27% в первой половине семидесятых годов [38].

Приведенные данные свидетельствуют о том, что постоянное увеличение горнопромышленного производства должно сопровождаться не только модернизацией технологии добычи и увеличением глубины разрабатываемых минеральных ресурсов, но и вовлечением новых объектов освоения минерального сырья, в первую очередь морского и океанического дна.

Потенциальные ресурсы Мирового океана могут быть подразделены на категории: 1) пресные и соленые воды, глубоководные высокоминерализованные рассолы и растворенные в них химические элементы; 2) современные и погребенные россыпи; 3) строительные материалы (песок, гравий, галька, щебень и пр.), связанные с верхней частью неконсолидированных морских осадков; 4) железомарганцевые, фосфоритовые и другие конкреции; 5) коренные месторождения в породах дна.

Практически все известные природные элементы растворимы в морской воде. При средней солености 3,5% в каждом из 1400 млн. км³ морской воды растворено около 35 млн. т со-

лей. В составе этих солей доминируют натрий и хлор (85%), которые вместе с семью другими элементами (магний, сера, кальций, калий, бром, углерод и стронций) составляют около 99% сухого остатка (табл. 1).

Таблица 1

Элементный состав морской воды (по К. М. Шигли)

Элементы	C·10 ⁴ , %	Элементы	C·10 ⁴ , %
Хлор	18 980	Иод	0,06
Натрий	10 561	Барий	0,03
Магний	1272	Алюминий	0,01
Сера	884	Железо	0,01
Кальций	400	Цинк	0,01
Калий	380	Молибден	0,01
Бром	65	Медь	0,003
Углерод	28	Мышьяк	0,003
Стронций	13	Уран	0,003
Бор	4,6	Марганец	0,002
Кремний	4,0—0,02	Ванадий	0,002
Фтор	1,4	Никель	0,002
Азот	0,5	Олово	0,0008
Литий	0,17	Селен	0,0004
Рубидий	0,12	Серебро	0,00004
Фосфор	0,07	Золото	0,000004

Примечание: С — содержание элемента.

В начале 70-х годов из морской воды в промышленных масштабах получали натрий, хлор, магний и бром. Развитие современной ядерной энергетики обусловило необходимость выделения тяжелой воды из вод теплых тропических течений. Проект такого завода, разработанный для Канады, предусматривает извлечение 200 г в день тяжелой воды из вод Гольф-стрима. Разработана технология извлечения урана из морской воды [79]. С морского дна в промышленных масштабах добываются нефть, газ, конденсат. Успешно эксплуатируется подводное месторождение барита. Различные кальциты (драгоценные и полудрагоценные кораллы, арагонит, ракушняки) используются в декоративных целях и в качестве сырья для производства строительных цементов. В породах морского дна разрабатываются сера, уголь, калий, рудные (железо, олово, золото, медь) и другие полезные ископаемые. Внимание исследователей привлекают также высокоминерализованные термальные рассолы и металлоносные илы глубоководных впадин Красного моря [58].

В современных прибрежно-морских россыпях внимание разработчиков привлекают железосодержащие пески, титан, цирконий, олово, золото, платина, алмазы, драгоценные и полу-

драгоценные камни. Железомарганцевые конкреции обогащены кобальтом, никелем, медью; фосфоритовые — ураном, радием.

Имеющиеся научные обзоры дают экономически обоснованную перспективу развития минерально-сырьевой базы акваторий мира [43, 96] и позволяют наметить в общих чертах тенденцию освоения минерального сырья в различных физико-географических районах Мирового океана.

Из 360 млн. км², занятых Мировым океаном [43], около 27 млн. км² (7%) приходится на область континентального шельфа — морского обрамления континентов, где глубины вод не превышают 200—300 м. Максимальная ширина шельфа может достигать 1200—1300 км. Материковый склон площадью около 39 млн. км² (11% поверхности Мирового океана) простирается до глубин 2—3 км. В пределах материкового склона углы наклона дна колеблются в пределах 3—45°. Ширина материкового склона, как правило, не превышает 30 км. Оставшиеся 82% поверхности Мирового океана приходятся на долю океанического ложа (282 млн. км² — 79%) и глубоководных впадин с глубинами более 6 км. Последние занимают площадь 11 млн. км² и на протяжении нескольких десятилетий были основным объектом экзотических глубоководных исследований.

В табл. 2 сопоставлена протяженность береговых линий и площадей континентального шельфа ряда стран.

Таблица 2

Длина береговой линии и площадь шельфа [76]

Страны	Длина береговой линии, тыс. км	Площадь шельфа, тыс. км ²		
		до глубины 200 м	до глубины 3000 м	до 200 миль от берега
Индонезия	37,2	2670	4020	5175
Австралия	27,9	2160	4730	6660
США	22,3	1780	2840	7220
Канада	20,5	2770	4060	4480
Филиппины	13,0	170	213	1810
Мексика	9,3	423	1130	2730
Япония	9,3	458	1440	3680
Бразилия	7,4	732	1420	3020
КНР	5,6	752	920	920
Великобритания	5,6	471	923	900
Новая Зеландия	5,6	232	1860	4600
Индия	5,6	430	1120	1920
Чили	5,6	26	550	2180

Основное направление геологопоисковых работ на шельфе связано с изучением горючих ископаемых. С 1960 до 1969 г.

Таблица 3

Твердые полезные ископаемые континентального шельфа [96]

Ископаемые	Запасы		Ресурсы		Ориентировочная потребность на 1966—2000 гг.	
	мировые	США	мировые	США	мировая	США
1	2	3	4	5	6	7
Алюминий (бокситы), млн. длинных т	5 800	45	9 600	300	840	440
Бериллий (короткие тонны эквивалентного бе- рилла)	—	—	1 650 000	1 000 000	540 000	360 000
Хром, млн. длинных тонн хромита	2 000	0	—	8	74	22
Медь, млн. коротких тонн	210	86	—	65	400	140
Кобальт, тыс. корот- ких тонн	2 200	50	—	—	1 300	600
Золото, млн. тройских унций — 31,1035 г	1 000	50	—	400	2 370	670
Промышленные алма- зы, млн. кар	—	0	—	0	3 600	1 700
Железные руды, млн. длинных тонн	250 000	8 000	250 000	100 000	35 000	6 400
Марганцевые руды, млн. длинных тонн	3 800	0	15 000	1 000	450	50
Никель, тыс. коротких тонн	60 000	250	—	1 400	31 700	14 500
Фосфаты, млн. длин- ных тонн	48 000	12 000	—	48 000	2 000	500
Углекислый кали — поташ, млн. коротких тонн K ₂ O	72 000	1 400	—	5 000	1 100	300
Группа платины, млн. тройских унций	280	3	—	—	250	144
Редкие земли, млн. коротких тонн	—	5	5	—	1	0,5
Серебро, млн. трой- ских унций	5 500	1 400	—	500	31 000	14 000
Сера, млн. коротких тонн	—	—	2 000	500	2 600	690
Олово, тыс. длинных тонн	5 600	9	11 400	43	9 200	3 200
Титан, млн. коротких тонн TiO ₂	500	100	—	—	100	50

Ископаемые	Запасы		Ресурсы		Ориентировочная потребность на 1966—2000 гг.	
	мировые	США	мировые	США	мировые	США
1	1	2	3	4	5	6
Торий, тыс. коротких тонн ThO_2	82	0	1 000	200	15	5
Вольфрам, тыс. коротких тонн	1 500	70	—	200	2 040	620
Уран, тыс. коротких тонн U_3O_8	742	210	2 700	675	3 750	1 500
Ванадий, тыс. коротких тонн	3 500	200	20 000	1 300	1 000	650
Циркон, млн. коротких тонн	30	6	—	—	10	3,0

Примечание. 1. Мировые запасы включают запасы США. 2. Одна короткая тонна (США) = 907,2 кг = 2000 фунтов; одна длинная тонна (Великобр.) = 1016,047 кг = 2240 фунтов.

мировая добыча нефти возросла в 6 раз. Разведанные запасы на континентальном шельфе за это время увеличились в 3 раза и составили 21% от общих морских запасов. К началу 70-х годов геолого-геофизические исследования в море проводились у берегов 75 стран, морское бурение — в 45 странах.

Около 20% мировой добычи нефти и свыше 6% газа добывается на акваториях вблизи побережий 30 стран. Ожидается, что к 1980 г. доля «морской» нефти составит 30—40% мировой добычи, превысит уровень добычи 1969 г. в 4 раза [96]. Увеличение добычи газа будет возрастать еще более высокими темпами.

Разведка твердых полезных ископаемых в море в 1969 г. проводилась у побережий 20 стран. Основные объекты разведки — титаномагнетитовые пески, олово, золото, алмазы, железомарганцевые конкреции, железистые глины, минерализованные рассолы и т. д. По расчетам американских ученых, запасы и ресурсы континентального шельфа по твердым полезным ископаемым (табл. 3) и нефти (табл. 4) оцениваются весьма высоко.

Из приведенных данных видно, что полезные ископаемые морского дна и в первую очередь шельфовых зон начинают

Потенциально нефтеносные площади континентального шельфа [96]

Районы шельфа	Площадь шельфа, тыс. км ²	Весьма перспективные		Перспективные	
		площадь, тыс. км ²	в % от ¹ мирового шельфа этой категории	площадь, тыс. км ²	в % от мирового шельфа этой категории
Северная Америка	7000	132	21,3	1050	19,0
Южная Америка	2900	66	10,6	490	9,1
Средняя и Восточная Азия	600	132	21,3	210	3,9
Восточноиндийские острова	4400	115	18,6	1000	18,4
Другие площади	20100	175,5	28,2	2680	49,6
Всего . . .	35000	620	100,0	5430	100,0

усиленно вовлекаться в сферу добычи. Эффективность морских добычных работ в значительной степени зависит от возможности получения достоверной предварительной геолого-геофизической информации о распределении полезных компонент в осадках морского дна. Одним из способов получения этой информации является исследование спектра естественной и наведенной гамма-активности донных пород *in situ*, а также изучение других свойств пород морского дна как в условиях их естественного залегания, так и в судовых и стационарных ядерно-физических лабораториях.

Успешное развитие фундаментальной ядерной физики привело к ее широкому проникновению в область наук о Земле. Это положило начало созданию ряда новых прикладных комплексов — ядерной геологии, геофизики, гидрофизики и т. д.

Как показали проведенные исследования, естественное гамма-поле современных морских осадков дает геологическую информацию не только при прямом геокартировании коренных пород, обнажающихся на морском дне, но и при исследованиях унаследованно развивающихся положительных тектонических (конседиментационных) антиклинальных структур в нефтегазоперспективных участках шельфа, что установлено на примере Каспийского, Черного и Азовского морей [69]. На участках морского дна, соответствующих сводовым частям структур, происходит накопление более крупнозернистых фракций осадков из-за сноса (вымывания) более тонких фракций в близлежащие пониженные участки. Эта закономерность в гранулометрической дифференциации наблюдается в южной части

Каспийского моря. Аналогичное явление прослеживается и по вертикальному разрезу пород в скважинах [2]. Отмечается также связь активности тектонических движений, процессов осадкообразования и величины амплитуды поднятия с гранулометрической дифференциацией [23] и с уменьшением интенсивности гамма-поля в сводовых частях конседиментационных структур по сравнению с их периклиналями.

Спектрометрия уран-радиевой и ториевой компонент естественного гамма-излучения дает дополнительные поисковые критерии при изучении образования и динамики развития современных прибрежно-морских россыпей титана, циркония, гафния; золото- и оловоносных зон; при изучении железомарганцевых конкреций, фосфорсодержащих осадков и месторождений баритов в условиях морского дна.

Спектрометрия захватного гамма-излучения, возникающего при облучении донных пород потоком нейтронов, в комплексе с нейтронно-активационными и гамма-активационными методами анализа имеет определенные перспективы при элементном анализе подводных образований различного генезиса, особенно при анализах высокоминерализованных рассолов и илов, выполняющих некоторые глубоководные впадины.

Развитие методики и техники прикладной ядерной геофизики базируется на дифференциации современных морских осадков по физическим свойствам. Это позволяет разрабатывать комплексные подводные ядерно-геофизические методы исследования. Такие комплексы должны быть достаточно эффективными как на этапе региональных (предпоисковых), так и на всех других стадиях поисково-разведочных работ.

В настоящее время накоплен материал, позволяющий оценить роль гаммаметрии при морских геологопоисковых исследованиях на шельфе, в основном применительно к нефтегазоносным структурам и современным прибрежно-морским россыпям. При нефтегазопоисковых работах данные гаммаметрии морского дна позволяют выделять перспективные площади для постановки детальных структурно-поисковых работ повместно в пределах шельфа, начиная от уреза воды; дают информацию для проведения предварительной разбраковки площадей, выявленных другими методами уже на поисковых этапах.

Современные прибрежно-морские россыпи имеют ряд специфических черт. Пока это единственный вид минерального сырья, обладающего способностью естественно регенерировать в течение конечного периода (от нескольких недель и больше). Изучение процессов образования и динамики поведения россыпей позволяет на основе данных гаммаметрии при соответствующих условиях организовать их непрерывно-циклическую эксплуатацию. Отработка россыпей по данным гаммаметрии может проводиться путем изменения глубины разрабатываемого

слоя песков по интервалу, отвечающему информативной глубине гаммаматрии — около 30 см.

Исследование петрофизических свойств при изучении такого важного параметра морских осадков и пород морского дна, как пористость, также может быть проведено *in situ* комплексом ядерно-геофизических и других методов. Представляется целесообразным применение гамма-гамма-метода, когда источником гамма-квантов является цезий-137, а детектором — сцинтилляционный блок детектирования (СБД). При выполнении замеров на станциях и в движении возможно проведение измерений прямого и обратного рассеяния. Дополнительная информация о плотности осадков (находящейся практически в линейной зависимости от пористости) может быть получена в случае отсутствия примесей глин и значительного количества минералов тяжелой фракции. Последние могут быть определены спектрометрией естественного гамма-излучения или с применением высокочастотной электромагнитной системы.

Проведение нейтрон-нейтронных (с радиево-бериллиевым источником) и нейтронных гамма-измерений позволяет оценить водородосодержание и пористость осадков. Эти исследования требуют дополнительного учета содержания хлора и глинистых компонент, что связано с проведением серии контрольных замеров.

Сейчас еще только начинается изучение месторождений полезных ископаемых, связанных с глубоководными минерализованными рассолами и илами. Обнаружены новые типы месторождений, приуроченных к рифтовым зонам. Среди дистанционных инструментальных методов исследований *in situ* значительная роль должна принадлежать гаммаматрии естественного, наведенного и захватного гамма-излучения.

Исследование закономерностей распределения естественных радиоактивных элементов в современных осадках морей и океанов и изучение на этой основе условий осадконакопления позволяет использовать методы гаммаметрии для создания оптимальных методик при поисках и разведке полезных ископаемых морского дна. Проявляющиеся в процессе осадкообразования определенные геологические и геохимические факторы (развитие коррозии, изменение направления транспортировки и условий захоронения терригенных компонент, химизм бассейна седиментации и т. п.) находят свое отображение в распределении естественных изотопов — гамма-излучателей. С одной стороны, могут доминировать явления, связанные с региональным тектогенезом, с другой — проявления локальных особенностей осадкообразования. Все это объективно отражается в распределении естественных изотопов — гамма-излучателей урана-радиевого, актино-уранового и ториевого рядов и радиоактивного изотопа калия. Поэтому на основе гаммаметрии становится возможным создание инструментальной методики исследования таких явлений, как развитие мощных вдольбереговых потоков наносов, деятельность подводных грязевых вулканов, рост конусов выносов крупных рек, различные техногенные процессы, современное подводное осадкообразование и т. п. Отображение в распределении естественных радиоактивных элементов вариаций в химическом, гранулометрическом и минералогическом составе осадков позволяет дифференцировать условия осадконакопления, что необходимо для изучения минерально-сырьевой базы морского дна.

Гаммаметрия, проводимая с помощью заглубленных до постоянного и устойчивого контакта с донными грунтами датчиков, позволяет использовать ядерно-геофизические методы для получения достоверной информации о геологическом строении и составе современных морских осадков и пород морского дна.

Естественные радиоактивные элементы в современных морских осадках

Радиоактивные элементы в зависимости от их распространенности и величины вклада в суммарную радиоактивность

литосферы разделены В. И. Барановым [6] на три группы. К первой группе отнесены наиболее распространенные в природе изотопы трех радиоактивных рядов: уран-радиевого (^{238}U), актино-уранового (^{235}U) и ториевого (^{232}Th) с продуктами их распада; калий-40 и рубидий-87. Вторая группа состоит из кальция-48, циркония-90, индия-113, олова-124, теллура-130, лантана-138, неодима-150, самария-152, лютеция-176, вольфрама-180, рения-187, висмута-207 и некоторых других. Несмотря на многочисленность изотопов второй группы, их суммарный вклад в общую радиоактивность много меньше, чем изотопов первой группы. В третью группу объединены изотопы, образующиеся в результате непрерывно протекающих ядерных реакций. Эти изотопы образуются при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов атмосферы. Основные представители этой группы — углерод (^{14}C) и тритий (^3H). В эту же группу входят и другие изотопы с коротким периодом полураспада, возникающие при взаимодействии атомных ядер и нейтронов земного и космического излучения. Развитие ядерной энергетики дает дополнительный вклад в число изотопов этой группы.

В результате радиогеохимических исследований осадочных пород, проведенных в последние десятилетия в Советском Союзе и за рубежом, получены обстоятельные данные о диапазонах содержания урана и тория в породах и о дифференциации пород на ряд геохимически специализированных комплексов [54].

Около 10^{12} г растворенного урана ежегодно осаждается в океане в виде уран-карбонатных соединений и осадков глубоководных бескислородных зон. Однако эти осадки составляют лишь около 10% от общего количества урана, поступающего в океан. Возможным объяснением этого несоответствия является как увеличение содержания урана из-за деятельности человека — внесение фосфатных удобрений, содержащих уран, расширенная культивация почв, приводящая к вымыванию из них урана, так и наличие широко распространенных урансодержащих осадков типа кремнистых илов и бескислородных отложений континентального шельфа [74]. Значительное количество урана осаждается вместе с железомарганцевыми и фосфоритовыми конкрециями.

Результаты изучения М. П. Альтгаузенем [3] закономерностей сингенетичного образования редких металлов и фосфора в морских осадках нижнего палеозоя показали важное металлогеническое значение сингенеза фосфора, урана и тория.

Широко развиты ураноносные фосфатные и углеродистые образования. В составе первых преобладают P_2O_5 и CaO , в меньшем количестве присутствуют SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , фтор, углекислый газ, органика. В фосфоритах уран содержится

в широких пределах — от 0,001 до 0,03% и выше, торий — $(5 \div 10) \cdot 10^{-4}\%$.

Распределение и содержание урана в терригенных осадках обуславливается гранулометрией и содержанием органического вещества ($C_{орг}$). Однако четкой корреляции между $C_{орг}$ и содержанием урана для пород с нормальной радиоактивностью не отмечается [57]. Результаты изучения распределения содержания урана и тория в осадочных образованиях земной коры с нормальной радиоактивностью, проведенное А. А. Смысловым [57], и в магматических породах, выполненное Ж. А. С. Адамсом (J. A. S Adams), П. Каспарини (P. Gasparini) [75], позволяют наметить основные тенденции измерения содержаний U и Th в породах различных типов. Увеличение содержания тория в осадочных породах связано с преобладанием устойчивых к выветриванию торийсодержащих акцессорных минералов (монацит, циркон, торит и др.). Увеличение содержания урана (при торий-урановом отношении ≤ 1) может сопровождаться увеличением $C_{орг}$ и может быть вызвано действием наложенных инфильтрационных процессов подземных и поверхностных вод, обогащенных ураном.

В результате исследований близких к кларковым первичных содержаний урана и тория в терригенных осадках — конгломератах, песчаниках и глинистых сланцах, формирующихся в разных геоструктурных зонах земной коры, отмечается зависимость содержания урана (и в меньшей степени тория) от гранулометрического состава пород. Эта зависимость реализуется в виде постепенного увеличения содержания урана в ряду от конгломератов, песчаников и алевролитов к аргиллитам. Отмечается также прямая зависимость содержания урана и тория от количества глинистых частиц. Исследование минералогического состава аргиллитов показало максимальное содержание тория в гидрослюдистых, а урана — в каолинитовых аргиллитах. Механизм переноса тория в бассейн седиментации предполагается В. А. Ковалевым [26] в виде сорбции тория частицами глины или гидроокислами железа.

А. А. Смысловым [57] в первично обогащенных естественными радиоактивными элементами осадочных породах выделяются два резко отличающихся радиогеохимических типа: а) существенно ториеносные и уран-ториеносные грубообломочные породы аллювиальных, прибрежно-морских и других фаций; б) существенно ураноносные с привносом органики и фосфора породы разнообразного состава (известняки, сланцы, песчаники) различной фациальной приуроченности.

К породам первого типа могут быть отнесены древние кварцевые конгломераты, а также консолидированные и современные (неконсолидированные) россыпи, в том числе и прибрежно-морского генезиса, обогащенные железом-магнетитовыми, титаносодержащими и акцессорными естественно радиоактивными минера-

лами (монацитом, цирконом, торитом, ортитом и т. д.). Кроме кварцевых песчаников и конгломератов, значительный интерес представляют урано- и золотоносные конгломераты. В последних содержание урана может достигать 0,1% и более.

Первично-ураноносные углеродистые сланцы (углистые, кремнистые и глинистые) широко распространены в разрезах от протерозоя до мезозоя и кайнозоя. Состав их варьирует из-за различия в содержаниях органического вещества, двуокиси кремния, урана, серы, сумм полупереходных окислов железа и алюминия. Степень их метаморфизма также весьма различна. В существенно углеродистых (углистых) разностях содержание урана может достигать 0,02—0,03%, снижаясь до 0,001% в углеродисто-кремнистых. Содержание тория в сланцах Евразийского континента фиксируется в пределах $(5 \div 35) \cdot 10^{-4}\%$ [57]. Совместно с ураном в сланцах концентрируются ванадий, фосфор, молибден, медь, свинец, хром, цинк, никель, серебро.

В результате изучения раннего диагенеза глубоководных морских осадков в связи с исследованием химизма урана, тория, ванадия, хрома, фосфора и некоторых других элементов [108] вскрыт ряд интересных зависимостей. Так, хром, ванадий и уран, обладающие слабой растворимостью в пределах малых уровней валентности, в отличие от марганца, обогащаются в слабо восстановительной обстановке осадкообразования. В верхней окислительной зоне наблюдается обогащение осадков фосфором и лантаном. Торий в миграционных циклах раннего диагенеза не участвует. Перераспределение урана в гемипелагических осадках приводит к нарушению равновесия ^{230}Th , ^{232}Th и ^{230}Th , ^{231}Pa , что легко обнаруживается при определении возраста исследуемых осадков. В большинстве работ часто наблюдается тенденция к завышению средних содержания марганца, фосфора, лантана, никеля и кобальта и занижению хрома, ванадия и урана из-за неучета отмеченных выше факторов. Оценка средних содержаний простым пересчетом полученных значений по верхним частям отобранных колонок (по данным геологического опробования) корректно выполнена быть не может.

В составленной по результатам исследований современных осадков Черного, Каспийского и Карибского морей, Тихого и Атлантического океанов [57] табл. 5 приводятся средние данные содержания урана и тория и их отношения. Постоянство содержания урана и отсутствие видимой его связи с гранулометрией осадка дало основание В. И. Баранову и Л. А. Христиановой [7] предполагать, что накопление урана на морском дне определяется формой его нахождения в морской воде (в виде устойчивых карбонатных комплексов). Накопление урана в осадках, обогащенных органическим веществом, имеет место как в стадии седиментогенеза, так и диагенеза. Мигра-

Содержание урана и тория в донных отложениях морей и океанов [57]

Породы	Радиогеохимическая характеристика			Повышенное содержание
	U·10 ⁴ , %	Th·10 ⁴ , %	Th/U	
Пески	3,0	1,3	0,4	—
	7,0	—	—	C _{орг}
Алевриты	2,3	2,8	1,2	C _{орг}
Алеврито-глинистые илы	2,7	4,8	1,8	H ₂ S, C _{орг}
	5,0—9,0	—	—	—
Известково-фораминиферовые алевриты	1,5	3,9	2,6	H ₂ S, C _{орг}
	1,4	—	—	—
Ракушняки	1,5	—	—	—
	4,2	—	—	P, C _{орг}
Слабокремнистые и кремнистые диатомовые илы	5,2	2,1	0,4	P
	31,0	—	—	P, C _{орг}
Красные глубоководные глины	4,0	6,6	1,8	—
Железомарганцевые конкреции	4,5	—	—	—

23/7
ция органики приводит к перераспределению урана и некоторых других элементов.

Изучение распределения содержания урана по разрезу позволяет предполагать обратную зависимость радиоактивности осадков от скорости осадкообразования. Осадкам с меньшей мощностью (при определенном цикле осадкообразования) обычно отвечает повышенное содержание урана и органического вещества.

Содержание тория в современных морских осадках обычно ниже кларкового. Это может быть объяснено невысоким содержанием тория и его слабой подвижностью в водных растворах (по сравнению с ураном). Поэтому, как правило, большая часть тория аккумулируется в прибрежно-морских фациях. Здесь повышенные содержания тория отмечаются в прибрежно-морских россыпях и среди глинистых осадков дельтовых зон. Иногда эти осадки заполняют локально пониженные места в рельефе прибрежного мелководья [61]. В глубоководных красных глинах отмечается повышенное содержание урана и тория — до $(10 \div 15) \cdot 10^{-4} \%$ [57].

Красные глины Северного моря уже сейчас вовлекаются в сферу промышленных изысканий в качестве сырья для получения алюминия. Как показано М. Науке (M. Nauke) [101],



в 1973—1975 гг. было отобрано около 800 000 т осадков, в том числе 15 000 т для основных экспериментов в специально созданных для этих целей исследовательских центрах. Не был оставлен без внимания и уран. Его содержание в осадках некоторых районов побережья Северного моря колеблется в пределах $(0,2 \div 1,5) \cdot 10^{-4} \%$ [112]. Максимальные количества его отмечаются в хорошо отсортированных осадках с увеличенными значениями $S_{\text{орг}}$. Высокая стоимость извлечения урана при современной технологии позволяет наладить рентабельное производство U_3O_8 при содержаниях урана в осадках от $10^{-2} \%$ и выше.

Как видно из приведенных данных, изучение геохимии урана и тория в процессе современного осадкообразования еще далеко от завершения. Однако имеются определенные предпосылки для изучения ураноносности (радиеносности) как поискового признака железомарганцевых и фосфоритовых конкреций. Ториеносность современных морских осадков может быть признаком развития современных прибрежно-морских россыпей разного (ильменит-рутил-цирконового, титаномагнетитового и т. п.) состава, что связано с увеличением минералов тяжелой фракции, в том числе и естественно радиоактивных — монацита, циркона и др. Вариации в содержании урана, радия и тория, зависящие от изменения гранулометрического состава осадков, что имеет место при литодинамических (конседиментационных) процессах, могут быть использованы при поисково-разведочных работах на унаследованно развивающиеся антиклинальные структуры в нефтегазоперспективных акваториях.

Гамма-поле морского дна и методы его изучения

Изучение естественного гамма-поля, проведенное в условиях земной поверхности и по разрезу скважин, позволяет устанавливать связь между распределением естественных радиоактивных элементов и литологическим составом отложений. В связи с этим значительный интерес представляет выяснение закономерностей распределения радиоэлементов в современных морских осадках и изучение на этой основе условий осадкообразования и процессов тектогенеза в пределах $\frac{2}{3}$ поверхности планеты, перекрытых водами морей и океанов. Начальный этап, как правило, связан с изучением естественного гамма-поля верхней части современных морских осадков.

Морские радиометрические методы исследований основаны на изучении закономерностей в распределении естественной радиоактивности донных осадков. Естественное гамма-излучение обусловлено наличием природных гамма-излучателей среди изотопов урана (радия) и тория и продуктов их распада и радиоактивного изотопа ^{40}K [6, 42]. Радиоактивный изотоп ^{40}K присутствует в природной смеси калия, где на его долю при-

ходится 0,0119%. Его вклад в суммарную гамма-активность принадлежит линии с энергией 1,465 МэВ [75]. По данным некоторых исследований [100], при регистрации спектра естественной гамма-активности земной поверхности сцинтилляционным детектором на цилиндрическом монокристалле NaI(Tl) размером 76,2×76,2 см (3×3 дюйма) вклады в аппаратный спектр калиевой, урановой и ториевой составляющих в импульсах в секунду соответственно равны 19,6:30,5:33,6. Вклад от рассеянной компоненты, обусловленной комптоновским рассеянием, составляет 359, около 5,3 приходится на фактор накопления.

Показано [6], что при прохождении естественного гамма-излучения через породы в результате процессов взаимодействия происходит изменение спектрального состава излучения и постепенно устанавливается насыщение. В этом случае при дальнейшем увеличении толщины излучающего слоя интенсивность и спектральный состав выходящего из породы и воздействующего на детектор излучения практически не изменяются. С достаточной степенью приближения можно считать, что слой толщиной 70—80 см практически является насыщенным для естественного гамма-излучения [6, 16 и др.].

Концентрации радиоактивных элементов в осадочных породах примерно соответствуют их содержаниям в изверженных породах среднего состава и несколько ниже, чем в гранитоидах. Вариации содержаний урана, радия, тория и калия и их отражение в общей (интегральной) интенсивности естественного гамма-излучения приведены в табл. 6.

Таким образом, по аналогии с естественным гамма-полем земной поверхности гамма-поле морского дна может рассматриваться как квазистационарное с учетом специфики прохождения естественного гамма-излучения через водную, а не через воздушную среду. Соответственно может быть применена и обычная методика исследований для регистрации суммарного (интегрального) гамма-поля энергии до 3 МэВ или его спектрометрии, выполняемой при неподвижном положении детектора (на станциях) или при непрерывном протягивании детектора по дну.

Подводный ядерно-геофизический элементный анализ и исследование физических свойств донных грунтов также могут выполняться с помощью иницирующих потоков нейтронов и гамма-квантов путем изучения наведенной активности и (или) гамма-излучения радиационного захвата нейтронов. В этих случаях для удобства измерения желательно иметь спектр исследуемого гамма-излучения в более жесткой области, чем область естественного гамма-излучения (больше 3 МэВ).

В уран-радиевом ряду основными гамма-излучателями являются изотопы RaB, RaC и RaC'. На их долю приходится около 98% суммарного гамма-излучения изотопов этого семейства. Естественное эманирование горных пород может вносить

Таблица 6

Распределение радиоактивных элементов в горных породах [5]

Породы, субстраты	Содержание элементов, %				Интегральная интенсивность гамма-излучения, мкР/ч
	Ra·10 ¹⁰	U·10 ⁴	Th·10 ⁴	K	
Земная кора	0,8	2,3	8,0	2,4	8,4
	0,6—1,3	1,8—4,4	5,0—13,0	2,3—2,6	5,8—8,0
Щелочные (сиениты)	1,6	4,7	18,5	4,9	18,0
	0,1—30,0	0,3—39,0	5,0—80,0	3,0—12,5	9,0—130,0
Кислые	1,2	3,5	15,5	3,6	15,0
	0,2—17,0	0,6—35,0	3,0—96,0	1,6—9,0	8,0—95,0
Средние	0,7	2,0	8,3	2,2	8,0
	0,1—1,9	0,3—5,6	2,0—34,0	0,8—6,8	2,0—23,0
Основные	0,3	0,9	3,5	1,0	3,5
	0,0—0,9	0,1—2,7	0,5—15,0	0,3—1,8	0,5—10,0
Ультраосновные	0,01	0,03	0,1	0,03	0,1
	0,0—0,02	0,0—0,06	0,0—0,3	0,0—0,2	0,0—2,0
Илы морей и океанов	2,0	3,2	4,6	1,2	6,5
	0,3—15,0	1,0—20,0	1,6—8,8	0,5—2,5	3,0—30,0
Известняки	0,4	1,2	2,5	0,4	2,5
	0,3—4,5	0,9—12,0	0,7—8,0	0,1—1,2	1,5—13,0
Сланцы	1,0	2,9	10,0	2,7	10,0
	0,1—5,0	0,3—90,0	8,0—17,0	0,7—3,2	5,0—25,0
Песчаники	0,7	2,1	9,0	2,1	7,5
	0,1—2,7	0,3—8,0	6,0—30,0	1,1—3,0	4,5—18,0
Вода морская	0,0001	0,003	0,001	0,04	0,0

Примечание. В числителе приведено среднее значение, в знаменателе — пределы возможных отклонений.

значительные погрешности в определении активности по гамма-излучению из-за изменения содержания радона [42]. Интенсивными гамма-излучателями ториевого ряда являются мезоторий-2 ($MSTh_2$) и продукты распада торона (ThB и ThC). При проведении гаммаметрии влияние изменений содержания торона менее существенно, чем радона. На долю гамма-излучения актино-уранового ряда приходится незначительная часть по сравнению с гамма-излучением уран-радиевого ряда. Считается, что для очень тонких слоев уран-радиевой руды выход гамма-излучения изотопов актино-уранового ряда не пре-

вышает 3% общего гамма-излучения. Так как их излучение расположено в низкоэнергетической части спектра, не будет большой ошибки, если при проведении полевых радиометрических измерений исключить влияние гамма-излучения актино-уранового ряда современных образований [42]. На основании изучения ослабления гамма-излучения в воде [59 и др.] и поглощения гамма-лучей в горных породах установлено, что наиболее приемлемым является метод регистрации естественного гамма-излучения современных морских осадков при некотором заглублении подводного контейнера — датчика излучения в исследуемую среду. При проведении непрерывных измерений необходима непрерывная регистрация телесного угла, которым стягиваются границы исследуемой зоны. Вершина этого угла лежит в центре детектора. Однако при сегодняшней технике измерений прямая регистрация этого параметра инструментально не производится. Косвенная оценка возможна другими методами, с которыми мы ознакомимся ниже.

Применение аналитических и статистических методов для решения задач морской гаммаметрии

Изучение геологического строения и процессов современного осадкообразования на дне морей и океанов может проводиться на основе исследования спектров естественного гамма-излучения пород морского дна и современных морских осадков. Предметом исследований могут быть дифференциальные и интегральные спектры. С достаточной точностью энергетический состав спектров гамма-излучения анализируется с помощью полупроводниковых детекторов (ППД) и сцинтилляционных блоков детектирования (СБД). Полученные аппаратурные спектры должны быть соответствующим образом нормированы в силу разной чувствительности детекторов к гамма-квантам разной энергии. Эта причина и ряд других привели к тому, что в настоящее время еще не решена задача получения истинных спектров гамма-излучения на основе аппаратурных.

Таким образом, возникает необходимость решения прямой задачи — расчет поля многократно рассеянного гамма-излучения в геометрии, максимально приближенной к реальной, с заданной наперед концентрацией радиоактивных изотопов. Эта задача сводится, в частности, к получению теоретического спектра гамма-излучения в детекторе. Возможна и обратная постановка задачи — определение содержания основных радиоактивных источников по полученным аппаратурным спектрам.

Описание механизма переноса гамма-излучения уравнением Больцмана [39] позволяет аналитическими методами получить ряд решений, применимых только к отдельным случаям простой геометрии. Известны решения уравнения Больцмана для гамма-квантов в приближении малых углов рассеяния; в слу-

чае малых энергий гамма-квантов решение реализуется в диффузном приближении [30]. Предложенный Спенсером и Фано в 1951 г. метод моментов получил достаточно широкое распространение при расчетах защитных устройств [30]. Однако точного решения уравнения Больцмана еще не найдено.

Возможны четыре вида взаимодействия [87]: I — основное взаимодействие с электронами атомов; II — основное взаимодействие с ядерными частицами; III — взаимодействие с электрическим полем, окружающим заряженные частицы — ядра и электроны; IV — взаимодействие с мезонным полем, окружающим ядерные частицы.

При взаимодействии гамма-квантов с веществом наблюдаются три вида эффекта:

A — полное поглощение — энергия фотона полностью поглощается взаимодействующей с ним системой внутри вещества;

B — упругое (когерентное) рассеяние — в результате взаимодействия фотона с атомом происходит рассеяние фотона. Вероятность рассеяния связана с вероятностью поглощения и находится в количественном с ней соотношении. Если атомная система в результате взаимодействия с фотоном перемещается как единое целое, то ее внутренняя энергия не возрастает и рассеяние является упругим. Эффекты упругого взаимодействия гамма-излучения с различными частями системы складываются когерентно (путем сложения амплитуд);

C — неупругое (некогерентное) рассеяние — при перемещении одной из атомных частиц относительно остальных, что ведет к увеличению внутренней энергии атомной системы и убыванию энергии фотона. Эффекты неупругого взаимодействия гамма-излучения с различными частями атомной системы складываются некогерентно (путем сложения интенсивностей эффектов).

Каждый вид взаимодействия (I—IV) может привести к любому из конечных результатов (A—C), чем и определяется тот или иной тип процесса,

Поскольку в интересной для нас области энергий (до 3 МэВ) большинство процессов имеют ничтожно малые сечения взаимодействия, рассмотрим три основных: 1) комптоновское рассеяние на электронах; 2) фотопоглощение гамма-квантов атомами вещества; 3) образование пары «электрон — позитрон» в поле ядер при энергиях гамма-квантов выше 1,02 МэВ. Физическая основа процессов взаимодействия гамма-квантов достаточно освещена как в общей, так и в специальной литературе [30, 32, 39, 40 и др.].

Изучение естественного гамма-излучения в силу статистического характера взаимодействия элементарных частиц с веществом среды, в которой распространяются эти частицы, может быть теоретически проведено с использованием вероятностно-статистического аппарата на основе метода Монте-Карло.

Этот метод достаточно широко используется при решении задач физики защиты, теории реакторов, в решении различных задач ядерной геофизики и т. д. [39 и др.].

Вероятность перехода частицы из одного состояния в другое в фазовом пространстве может быть оценена экспериментально. На этой основе можно провести моделирование истории отдельной частицы. Изучение достаточно большого числа историй (траекторий) частиц позволяет исследовать картину прохождения излучения через вещество.

Пренебрегая взаимодействием гамма-квантов друг с другом, описываем процессы переноса гамма-квантов линейным уравнением Больцмана. Таким образом, вероятность перехода гамма-кванта в каждое следующее состояние определяется только предыдущим. Следовательно, возможно отдельно изучать траектории гамма-квантов, вычисляя искомые величины как средние по сумме траекторий. Если же взаимодействием гамма-квантов пренебречь нельзя, то в теории переноса возникает нелинейная задача.

Решение прямой задачи проводится поэтапно. На первом этапе моделируется источник излучения. Задается функция плотности вероятности, характеризующая источник, и реализуется случайная величина в соответствии с этой функцией. На втором этапе моделируется переход гамма-кванта. Последовательным определением расстояния до точки следующего взаимодействия определяется, не выходят ли текущие координаты гамма-кванта из границ заданного пространства, и в соответствии с заданными вероятностями при начальной энергии определяется тип взаимодействия гамма-кванта с веществом (фотоэффект, комптон-эффект, образование пар). Затем определяются угол рассеяния и новая энергия рассеянного гамма-кванта, либо направление движения и энергия каждого из пары родившихся квантов. Следующий этап состоит в последовательной реализации ряда операций, описанных выше. Реализация проводится до окончания истории гамма-кванта (в случае его гибели либо по другим причинам) или до набора достаточного для целей исследований количества историй.

Статистическая природа метода Монте-Карло обусловила его медленную сходимость, что увеличивает продолжительность расчетов с использованием машинного (ЭВМ) времени для получения достаточно точного результата. Найдены и описаны способы ускорения сходимости решения и рациональной организации программы вычислений [32, 40].

В реальной геометрии гаммаматрии морского дна с использованием непрерывно волочащегося по дну подводного контейнера датчик гамма-излучения — цилиндрическая гильза располагается на границе раздела вода — грунт. В зависимости от плотности грунта варьирует величина телесного угла, стягивающего равномерно распределенные в грунте радиоактивные

излучатели. Оси детектора — цилиндрического кристалла сцинтиллятора NaI(Tl) — и гильзы совпадают. Сцинтилляционный блок детектирования (монокристалл и фотоэлектронный умножитель) помещен в светонепроницаемый тонкостенный стальной кожух, выполняющий функции магнитного экрана. Этот кожух размещается внутри толстостенной металлической

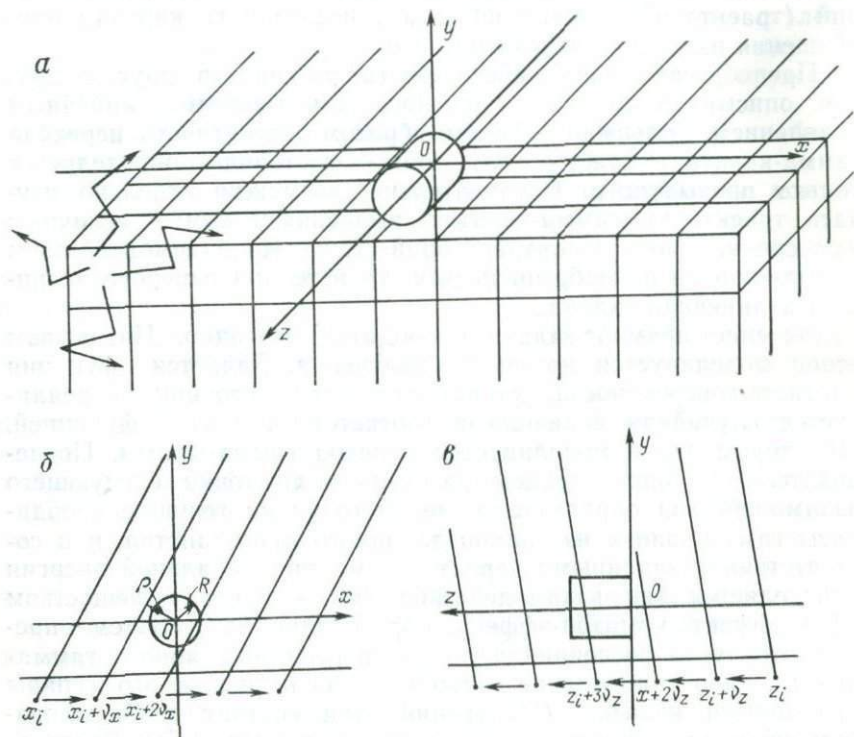


Рис. 1. Геометрия, принятая для расчетов спектров, их изменение
 а — геометрия измерений, положенная в основу расчетов; б, в — схемы трансляций по
 лучающего слоя: 1 — 24 ÷ 16 см, 2 — 16 ÷ 8 см, 3 — 8 ÷ 0 см, 4 — суммарный; д — сходимости

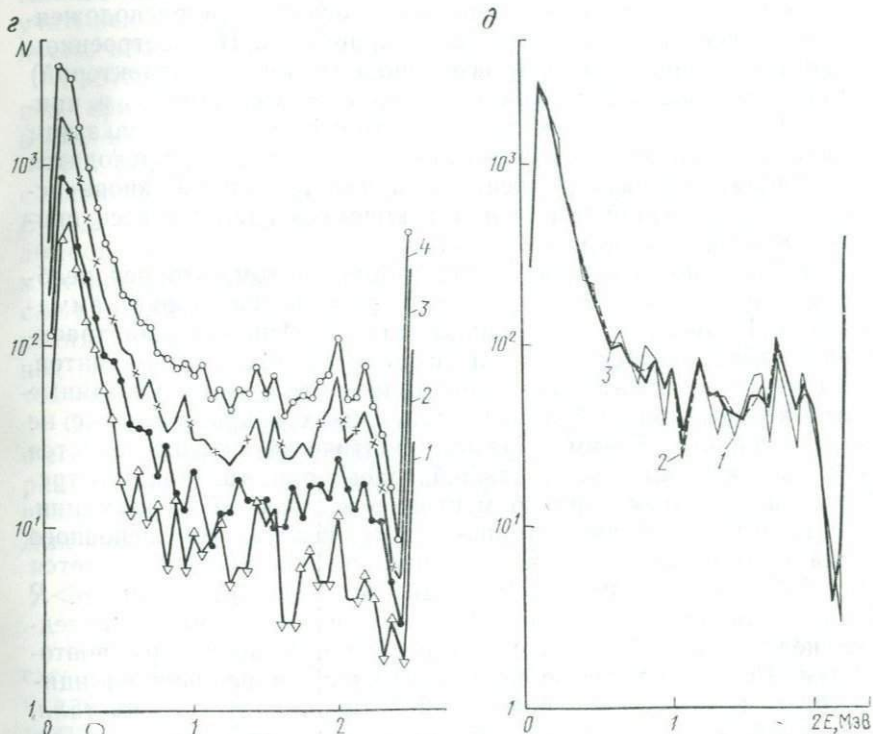
гильзы. В первом приближении для решения задачи нами была принята исходная геометрия, изображенная на рис. 1, а.

Принципиальная трудность расчета задач подобного рода заключается в том, что источники распределены по всему нижнему полупространству (грунту). Вкладом гамма-активности воды, окружающей детектор, как показывают эксперименты, можно пренебречь. Однако разыгрывать положение источника по всему нижнему полупространству неэффективно, поскольку лишь незначительная часть гамма-квантов попадает в кри-

сталл. Накладываем ограничение по области, не превышающей длину свободного пробега [30]:

$$\mu(E) R \geq 4, \quad (1)$$

где E — максимальная энергия кванта; R — длина свободного пробега; μ — функция ослабления.



от глубины излучающего слоя и сходимость результатов.

осям x и z ; z — теоретические спектры и их трансформации при изменениях глубины излучения; результаты при изменении числа траекторий: 1 — 3×10^3 , 2 — 6×10^3 , 3 — 9×10^3

Эмпирически величина R принимается не более 40 см. Такое ограничение области исследования дает некоторое ускорение расчета, но оно весьма невелико.

Другой метод ускорения состоит в применении известного алгоритма расчета естественных гамма-полей, использующего способ коррелированных траекторий с трансляцией последних. Его рациональное зерно состоит в том, что одна и та же последовательность псевдослучайных чисел используется для моделирования траекторий, начинающихся в разных точках породы.

В нашей задаче нижнее полупространство гамма-излучателей (грунт) разбивается на произвольное количество ячеек равной величины, как показано на рис. 1, а. Каждая ячейка представлена в виде куба со стороной, равной высоте (и диаметру) монокристалла ($80 \times 80 \times 80$ мм). Таких ячеек, согласно неравенству (1), было $11 \times 11 \times 8$. Затем строится нужное количество историй гамма-квантов (в нашем случае 6000), берущих начало в одной из ячеек, называемой основной и расположенной на максимальном удалении от кристалла. На построенном пучке траекторий (назовем его основным пучком траекторий) будут исследоваться случаи попадания гамма-квантов в кристалл. Построенное множество траекторий запоминается, затем начала всех траекторий сдвигаются в сторону (проводится трансляция) на размер ячейки и пучок траекторий вновь исследуется на случай попадания в кристалл. Дальше весь процесс последовательно повторяется.

Удобство приведенной схемы состоит в том, что нет необходимости каждый раз заново разыгрывать траектории гамма-квантов. Кроме того, уже при анализе основного пучка траекторий отбрасывается весь класс историй тех гамма-квантов, узлы которых лежат ниже кристалла, из-за чего указанные гамма-кванты при выбранных трансляциях в кристалл уже не смогут попасть. Таким образом, фактически осуществляется последовательный анализ каждой траектории, так как это требует запоминания гораздо меньшего количества информации.

Рассмотрим i -тую историю гамма-кванта из основного луча траекторий. Пусть эта история графически изображается рис. 1, б. Определим прицельный параметр ρ . Если $\rho > R$ (радиус кристалла), то $x_i \rightarrow x_i + 2v_x$ и снова проверяется последнее неравенство. В случае его реализации процедура повторяется. Если неравенство не реализуется, то реальна принципиальная возможность попадания гамма-кванта в кристалл. При найденном значении x_i путем трансляции по оси z отыскивается такое значение $z_i + kv_z$ (рис. 1, в), при котором линия с заданными значениями u_i, v_i, ω_i пересекает поверхность кристалла. Затем определяется длина пробега гамма-кванта. В случае его пролета сквозь (за) кристалл или же недолета до кристалла вновь продолжается трансляция по оси z . Если длина пробега заканчивается в кристалле, дальнейшая его история исследуется по известному алгоритму [59], и только по этим результатам продолжается трансляция по z . После реализации выбранного числа трансляций по z вновь переходят к трансляции по x и так далее. Завершив анализ i -той истории гамма-кванта, переходят к исследованию $(i+1)$ -й истории по описанной схеме.

Для получения информации от источников, расположенных на большом расстоянии от кристалла, вводится схема весов [32, 39]. В этом случае предполагается, что в результате каж-

дого взаимодействия гамма-кванта с веществом породы (донного грунта) происходит комптоновское рассеяние, а возникающее в связи с этим смещение кванта направляется так, что гамма-квант изменяет вес на величину отношения σ_1/σ_2 . Начальный вес гамма-кванта принимается равным единице. При этом не учитываются процессы, связанные с распространением аннигиляционных гамма-квантов в породе. В кристалле же они учитываются точно. При заданной начальной энергии погрешность, вносимая указанным приближением, невелика.

Расчет процессов взаимодействия гамма-квантов с веществом кристалла проводится на основе алгоритма, описанного в [32, 40].

На рис. 1, г ясно видны характерные изменения спектра с изменением глубины излучающего слоя. Спектры для $E=2,2$ МэВ, представленные на рис. 1, д, иллюстрируют сходимость результатов расчета при увеличении числа исследуемых историй. Характерные точки спектра — край комптоновского распределения, пик вылета одного аннигиляционного кванта, пик вылета двух аннигиляционных квантов и основной фотопик (полного поглощения) — совпадают при принятой нами нормировке на единичный источник.

Особенностью рассматриваемого алгоритма является то, что с его помощью можно проводить расчеты по отдельной регистрации спектра от каждого слоя грунта толщиной 8 см. Это позволило оценить глубинность метода гаммаметрии L [32]. Для простейших оценок можно принять

$$L \approx 3,5/\mu(E). \quad (2)$$

Изложенное позволяет сделать вывод, что составленная схема расчета и полученные результаты могут быть применены и для количественной интерпретации экспериментальных аппаратурных спектров при определениях содержаний радиоактивных элементов в горных породах и современных морских осадках.

Для определения содержания радиоактивных изотопов калия, радия и тория по схеме измерений в трех каналах с энергетическими интервалами 1,35—1,65 МэВ для калия, 1,7—1,85 МэВ для радия и 2,45—2,85 МэВ для тория составляется система трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= a_1 Q_K + b_1 Q_{Ra} + c_1 Q_{Th}, \\ I_2 &= b_2 Q_{Ra} + c_2 Q_{Th}, \\ I_3 &= c_3 Q_{Th}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где I_i — интенсивность счета в i -том канале; Q_K , Q_{Th} , Q_{Ra} — концентрации калия, тория и радия в %.

Решив систему, получим

$$\left. \begin{aligned} Q_K &= \frac{1}{a_1} I_1 - \frac{1}{a_1} \frac{b_1}{b_2} I_2 - \frac{1}{a_1} \left[\frac{c_1}{c_2} - \frac{b_1 c_2}{b_2 c_3} \right] I_3, \\ Q_{Ra} &= \frac{1}{b_2} I_2 - \frac{1}{b_2} \frac{c_2}{c_3} I_3, \\ Q_{Th} &= \frac{1}{c_3} I_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

и запишем ее в матричной форме

$$|Q| = |A|^{-1} |I|. \quad (5)$$

Проведенные расчеты позволяют в условиях геометрии, близкой к реальной, и в предположении заданных концентраций радиоактивных изотопов провести исследование поля многократно рассеянного гамма-излучения и, в частности, получить теоретический спектр гамма-излучения в монокристалле сцинтилляционного блока детектирования. Последнее дает возможность подойти к решению обратной задачи — определению концентрации основных гамма-излучателей по измеряемым спектрам.

Аппаратура, методика и техника исследований гамма-поля морского дна и обработка результатов съемки

Основная информация при проведении морских ядерно-геофизических исследований поступает с морского дна благодаря использованию дистанционных телеметрических систем. Меньшая часть этих данных необходима для контроля стабильности самой системы; большая часть (результат взаимодействия среды и инструмента) — источник данных об интенсивности и спектральном составе гамма-поля морского дна.

Регистрация исследуемых физических свойств производится в виде условных единиц — импульсов, нормируемых по параметрам (амплитуде или длительности) и по времени измерений. Переход от них к реальным физическим величинам повсеместно требует выполнения определенных арифметических операций, а часто и логического анализа. Отдельные узлы аппаратуры являются исполнителями этих функций.

Одним из сложных вопросов интерпретации результатов подводных исследований является учет геометрии измерений. Если принять геометрию измерений по площади априорно постоянной, то с известной степенью приближения можно проводить корреляцию данных. Согласно общепринятой методике исследований, измерения проводятся непрерывно по заданному направлению (профилю, маршруту). Расстояния между профилями определяются необходимой детальностью исследований и задаются исходя из опыта работ и поставленной геолого-геофизической задачи. Контроль равномерности движения и отклонения исследовательского судна от заданного маршрута (линии проложения профиля) производится с помощью специальных устройств. Как правило, употребляются средства радионавигации, обеспечивающие наиболее точную привязку результатов исследований в заданном масштабе карты.

Сопоставление исследуемого гамма-поля с составом и строением образцов, отобранных на профилях, по которым проводились ядерно-геофизические измерения, позволяет достоверно интерпретировать результаты съемки. Кроме ядерно-геофизических исследований, с судна одновременно могут производиться сейсмические, электрометрические, магнитометрические, гравиметрические, термометрические или какие-либо другие виды морских исследований. Проводя комплексные исследования не-

скольких физических параметров, можно получить непрерывную, достоверную и комплексную информацию.

Необходимость и достаточность получаемой информации определяют рациональный комплекс применяемых методов исследований, аппаратуру, методику и технику проведения измерений.

Основные принципы построения аппаратуры

Изучение современных морских осадков проводится путем исследований их радиоактивности. Естественное гамма-излучение горных пород достаточно широко используется в прикладной ядерной геофизике при исследованиях земной поверхности (аэро- и автосъемка, пешеходная съемка и т. д.) и для изучения разрезов скважин. В последнее время значительное развитие получает спектрометрия естественного гамма-излучения, а также нейтронная и гамма-активация и спектрометрия гамма-излучения радиационного захвата нейтронов.

Проведенные нами исследования в основном базировались на непрерывной интегральной гаммаметрии энергий до 3 МэВ с замерами дифференциальных спектров на станциях с помощью 50-, 128-, 200-канальных амплитудных анализаторов. Благодаря высокой чувствительности и эффективности сцинтилляционного блока детектирования к гамма-излучению он является удобным прибором для измерения естественной радиоактивности. Другими важными преимуществами СБД являются большая разрешающая способность (до 10^{-9} с), линейная зависимость величины амплитуды импульса от энергии гамма-кванта и небольшая величина собственного фона. СБД состоят из двух основных элементов — сцинтиллятора (фосфора), преобразующего ядерное излучение в световое, и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), в котором вспышки света сцинтиллятора преобразуются в электрические импульсы, одновременно усиливаемые ФЭУ до 2^n раз (n — число каскадов усиления). Совмещение свойств фотоэлемента и электронного усилителя обусловило широкое применение ФЭУ при детектировании ядерных частиц СБД.

Параметры различных СБД определяются качеством и стабильностью работы ФЭУ и сцинтилляторов. При прочих равных условиях известные ограничения накладываются нелинейными зависимостями, связанными с изменением температурных условий, наличием собственных шумов, разбросами параметров отдельных ФЭУ, влиянием активаторов и относительной дороговизной сцинтиллирующих монокристаллов, а также известной сложностью конструкции детектирующих систем.

Наиболее широкое применение получили кристаллические сцинтилляторы из нодитов натрия и цезия. В качестве актива-

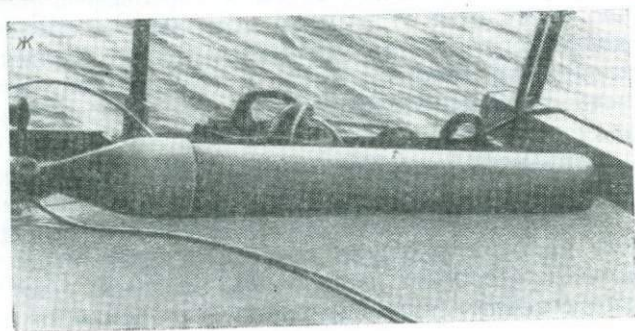
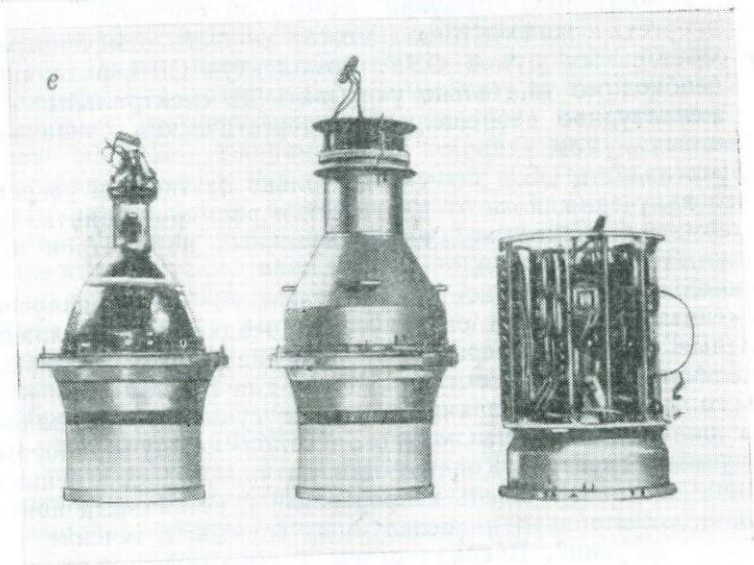
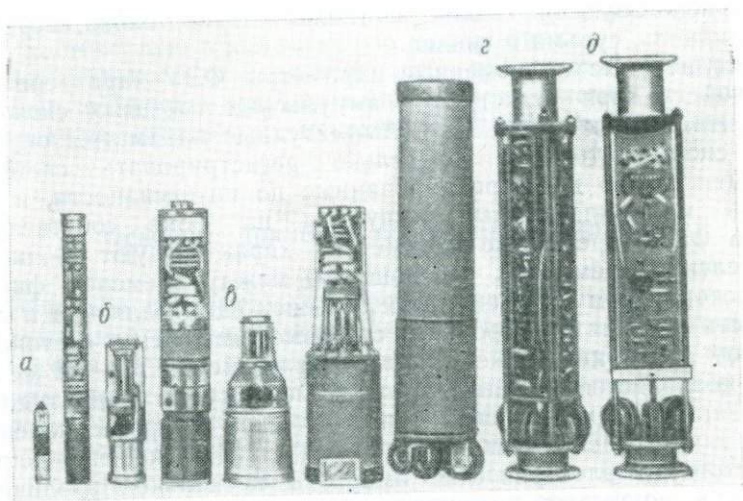
торов используются таллий, а также натрий, олово, серебро, медь, никель, сурьма и свинец.

Амплитудные и временные параметры ФЭУ характеризуют их свойства при регистрации импульсных световых сигналов в сцинтилляционной технике. Амплитудные параметры определяют способность ФЭУ разделять регистрировать световые вспышки, слабо дифференцированные по интенсивности, и выделять малоамплитудные импульсы на фоне собственных шумов ФЭУ. Временные параметры характеризуют точность определения временных соотношений между временем фиксации фотокатодом ФЭУ световых вспышек сцинтиллятора и способность разделять короткие световые импульсы, отстоящие друг от друга на малые промежутки времени. Тем не менее, ФЭУ не является идеальным инструментом для амплитудного анализа, поскольку в силу статистической природы явления, во-первых, световым вспышкам равной яркости (интенсивности) соответствуют электрические импульсы несколько различных амплитуд, во-вторых, импульс от слабой световой вспышки (низкоэнергетическая частица) может не быть отмеченным на фоне собственных шумов ФЭУ. Комплектуя СБД различными ФЭУ, необходимо тщательно учитывать их спектральные свойства, амплитудное разрешение и энергетический эквивалент собственных шумов.

Эффективность СБД зависит не только от энергии регистрируемого излучения, но и от плотности и размеров сцинтилляторов, геометрии измерения, индивидуальных параметров ФЭУ, его режима работы и т. п.

Невысокая интенсивность естественного гамма-излучения современных морских и океанических осадков, определяющая локальные эффекты и среднефоновые значения, предъявляет определенные требования к аппаратуре для гаммаметрии пород морского дна. На показания прибора существенное влияние может оказать величина водяного столба между прибором и исследуемым грунтом. Конструкция датчика, где размещается СБД, должна обеспечивать непрерывный и устойчивый контакт подводного контейнера и исследуемых грунтов в течение всего процесса измерений. В связи с тем что рельеф морского дна значительно отличается от плоской поверхности, оболочка подводного контейнера-датчика гамма-излучения должна быть достаточно прочной, вибростойкой и герметичной, способной выдерживать длительное волочение по дну на скоростях 3—8 узлов.

Рассмотренные раньше [36, 69] принципы компоновки блок-схемы подводного радиометра для непрерывной гаммаметрии морского дна, построения подводных датчиков и вывода с них информации на борт судна за последнее время существенных изменений не претерпели. В основном развитие шло по пути технического совершенствования радиоэлектроники за счет при-



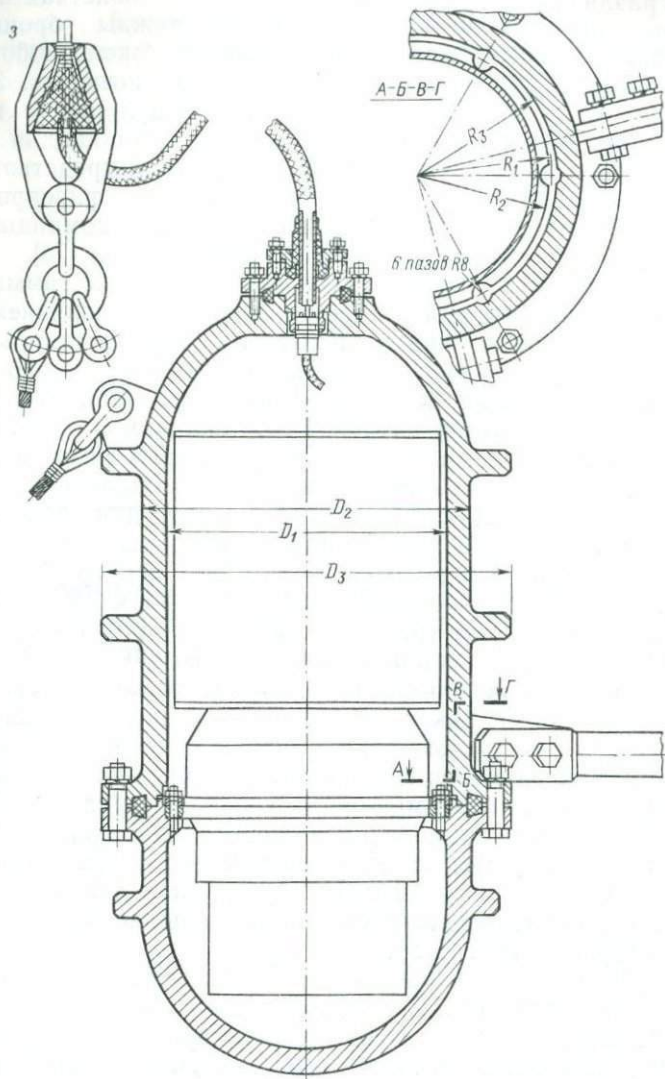


Рис. 2. СБД, схемы, гильза и контейнер подводного радиометра и спектрометра.
 СБД на: *a* — ФЭУ-31; *б* — ФЭУ-13; *в* — ФЭУ-52, ФЭУ-56 и др.; *г* — СБД на ФЭУ-49; схемы;
д — спектрометра СГС-1, *е* — радиометра МОРС; *ж* — гильза МОРС и СГС-1; *з* — схема
 подводного контейнера для замеров с большими СБД на станциях

менения современных деталей и узлов. Так, на конференции по технике морских исследований в Сан-Диего (Калифорния, США) в 1971 г. была рассмотрена глубоководная телеметрическая система для передачи на судно с глубины до

1800 м различной информации о физических свойствах осадков. Передача информации выполняется по дважды бронированному коаксиальному кабелю-тросу длиной около 3000 м по 100 каналам и записывается на магнитный носитель. Это достигается путем применения частотной модуляции с полосой пропускания 100 кГц. Выбор какого-либо датчика для вывода с него информации осуществляется с судна посредством определенных команд — двухчастотных сигналов, фиксированных для разных датчиков. Результаты измерений и команды датчикам могут передаваться по кабелю одновременно [78].

Оптимальным вариантом проведения морской гаммаметрии следует считать тот, при котором информация, получаемая при непрерывной съемке (интегральные или дифференциальные измерения спектра с информативной глубиной около 30 см), дополняется данными пенетрационных измерений на глубину до нескольких десятков метров. Естественно, что для таких исследований необходимо иметь СБД различных размеров и конструкций. Так, для пенетрационного задавливания могут быть рекомендованы СБД на ФЭУ-31 (рис. 2, а) или иные с внешним диаметром до 22 мм со сцинтилляционными монокристаллами диаметром 18 и высотой 30 мм. Для непрерывной гаммаметрии могут быть использованы СБД на ФЭУ-13 и монокристаллах 40×50 мм (рис. 2, б), а также на ФЭУ-52, ФЭУ-56, ФЭУ-110 и др., с монокристаллами 76×76 мм (рис. 2, в). Последние могут использоваться для спектрометрических исследований (рис. 2, г) как наиболее подходящие по эффективному объему и амплитудному разрешению, которое ухудшается с увеличением размеров сцинтилляторов. Однако для получения предварительной информации об урановой (радиевой), ториевой или калиевой природе наблюдаемых зон аномальных значений при спектрометрии по станциям (на точках) могут применяться СБД на ФЭУ-49 и монокристаллах диаметром 150 мм (рис. 2, е), помещаемые в специальные подводные аппаратурные контейнеры (рис. 2, з).

СБД на ФЭУ-31 и ФЭУ-13 входили в комплект скважинного гамма-спектрометра СГС-1 [56]. Оптимальное амплитудное разрешение СБД определяется соответствующими параметрами ФЭУ и монокристалла. Известно, что полное амплитудное разрешение СБД может быть определено как среднее геометрическое по амплитудному разрешению ФЭУ и сцинтиллирующего монокристалла [36].

Существенный вклад в аппаратурный спектр вносят естественные радиоактивные изотопы, практически повсеместно входящие в материалы панелей и цоколя ФЭУ и стекло монокристалла. В работе [98] показано влияние защиты на фон гамма-лучей (табл. 7) для монокристалла NaI(Tl) размером 76×76 мм и проведено сопоставление фонов двух кристаллов иодистого натрия, активированных таллием (табл. 8).

Влияние защиты на фон гамма-лучей [98]

Экран, мм	Интегральный фон имп/мин для интервалов энергий	
	0,2—2,5 МэВ	0,07—2,5 МэВ
Без экрана	576,4	—
Сталь:		
19	312,2	—
38	173,2	—
76	84,2	—
152	46,4	—
203	41,0	62,0
203 сталь +51 свинец	29,5	41,0
203 сталь +25 ртуть	26,0	35,0
203 сталь +51 свинец + +25 ртуть	25,0	32,5

Таблица 8

Компоненты фона двух кристаллов NaI (Тl) [98]

Параметры	I	II
Общий фон, имп/мин	75	127
Космические лучи	15	27
^{40}K (γ -лучи)	8	15
Фотоумножитель	25	30
Остался неопределенным:		
а — общий остаток	27	55
б — удельный остаток, (имп/мин)/г	0,042	0,047

Примечание. I — кристалл 63,5×54 мм объемом 171 см³; II — кристалл 102×38 мм объемом 309 см³.

СБД на монокристаллах 76×76 мм и ФЭУ с внешним диаметром фотокатода 80 мм были использованы нами для непрерывной гаммаметрии (см. рис. 2, в) и исследования спектра естественной радиоактивности *in situ* на Каспийском, Азовском, Балтийском, Японском и Охотском морях. Для СБД этого типа была сконструирована гильза (рис. 2, ж) и опробована методика и техника исследований с различных плавсредств при многоцелевых морских исследованиях. СБД, заключенный в светонепроницаемый антимагнитный экран (см. рис. 2, в) жестко сочленялся с радиосхемой, выполненной в интегральном (см. рис. 2, д) или спектрометрическом (см. рис. 2, з) вариантах. Осевые нагрузки на гильзу и СБД и вызванные ими

перемещения гасились продольными резиновыми амортизаторами; радиальные — резиновыми роликами, по которым СБД и радиосхема вдвигались в гильзу. В передней части гильзы виден носовой обтекатель-утяжелитель. Дополнительные кормовые утяжелители крепились к хвостовой части гильзы. Вывод дважды бронированного кабеля-буксира (типа КОБД, КТБД или КРК) из носового обтекателя-утяжелителя проводился внутри двух соосно размещенных специальных стальных пружин, навитых в противоположных направлениях. Последние уплотнялись киперной лентой и укреплялись снаружи гибким шланговым рукавом, армированным изнутри стальной проволокой. Как показал опыт работ, место выхода кабеля-буксира из носового обтекателя — одно из самых опасных сечений на изломе кабеля при непрерывном протягивании гильзы с датчиком по морскому дну.

Специально для морских радиометрических исследований проведены разработки по созданию действующего макета морского сцинтилляционного радиометра МОРС и согласованию механической конструкции со скважинным прибором многоканального гамма-излучения со скважинным прибором многоканального гамма-спектрометра СГС-1 [56, 69, 89].

Морской сцинтилляционный гамма-радиометр МОРС предназначен для непрерывной гаммаматрии донных грунтов в условиях их естественного залегания и для замеров по станциям. Для проведения замеров различной интенсивности гамма-излучения (от 0 до 1000 имп/с — около 25 мкР/ч) в приборе предусмотрено восемь поддиапазонов. Для исследований с различными скоростями протягивания датчика по дну и для градуировочных замеров имеются три фиксированных значения постоянной времени интегрирования — $2,4 \pm 0,6$; $7,2 \pm 1,8$ и $18 \pm 2,1$ с. Нелинейность счетной градуировочной характеристики сцинтилляционного блока не превышает $\pm 5\%$. Основная погрешность измерения, отнесенная к шкале используемого диапазона, не хуже $\pm 3\%$. Прибор может питаться от сети переменного тока 127/220 В стандартной частоты 50 Гц и от бортовой сети постоянного тока 26 В.

Пульт радиометра имеет габариты $250 \times 250 \times 200$ мм и массу около 5 кг. Подводный контейнер массой порядка 40 кг выполнен в виде гильзы с внешним диаметром 147 мм и длиной 1250 мм. Радиометр комплектуется стандартным самопишущим регистратором (Н-340, Н-360 и др.). Прибор рассчитан на работу с коротажным кабелем, имеющим разрывное усилие от 2 до 6 тс.

Как показал опыт многолетних работ с прибором МОРС, использование монокристалла размером 80×80 мм и ФЭУ-52 и ФЭУ-56 позволило устойчиво обеспечивать чувствительность на уровне 60—35 имп/с на 1 мкР/ч. Градуирование проводится радиевым или ториевым эталоном по стандартной методике [41]

и сопровождается снятием остаточного фона прибора. Для снятия остаточного фона необходимо заглубление датчика на глубину 7 м, чтобы от датчика до дна было не менее 5—7 м [44]. Проверка чувствительности прибора контрольными источниками (пробниками) гамма-излучения производится в условиях жестко фиксированной геометрии измерений. Обеспечивая среднеквадратичную ошибку не хуже $\pm 0,16$ мкР/ч, можно получать результирующий материал с сечением изолиний 0,5 мкР/ч.

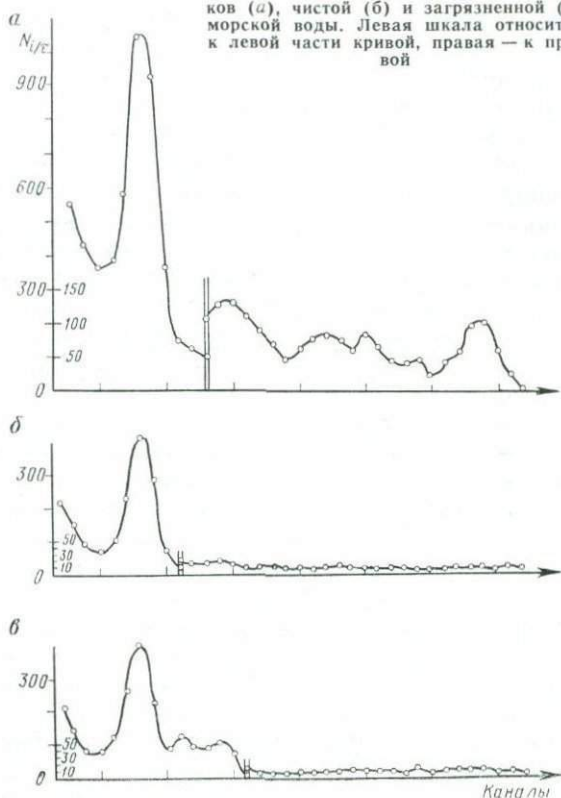
Существенным представляется также исследование спектрального состава естественного гамма-излучения по энергетическим интервалам для калия 1,35—1,65 МэВ, для радия 1,7—1,85 МэВ, для тория 2,45—2,85 МэВ, а также для суммы радия и тория в интервале 1,9—2,40 МэВ. Такие измерения могут выполняться на станциях или при движении вдоль профиля исследований.

Снятие остаточного фона при спектрометрических исследованиях проводится так же, как и при работе с интенсиметром. Как видно из приведенных спектрограмм, наблюдается изменение спектров за счет растворенных в морской воде радия и калия. Нормированные по времени спектрограммы приведены на рис. 3. Экспозиция при снятии остаточного фона может превышать экспозицию замера на станции в 2 раза с последующей нормировкой числа импульсов в канале по времени замера.

Описанная конструкция СБД, радиосхем, подводной гильзы, кабеля-троса (буксира) и надводного судового пульта управления и записи информации, воплощенные в ряде сцинтилляционных морских радиометров МОРС-59 — МОРС-68м [20, 69], опробованных при натурных исследованиях, свидетельствуют об их достаточной эффективности и надежности в работе. Так, например, при исследованиях на Японском море одним датчиком было отработано около 500 км профиля без подъема датчика на борт.

Применение многоканальной гамма-спектрометрии, основанной на раздельной регистрации вкладов урана (радия), тория и калия в верхних слоях современных морских осадков, описано Е. Н. Невеским, В. В. Костоглодовым и другими [45, 47]. Как показано авторами, ядерно-геофизическая информация позволяет получать новые результаты по литологии донных осадков. Аналогичное исследование состава естественного гамма-излучения земной поверхности, показанное в работе [100], проведено с использованием сцинтилляционного монокристалла NaI(Tl) размером 76×76 мм (3×3 дюйма). Приводится количественная оценка вкладов изотопов урана (радия), тория, калия и рассеянной компоненты. Созданный на базе такого СБД подводный гамма-спектрометр для непрерывной гамма-метрии морского дна прошел натурные испытания у берегов Англии [80]. Реализованная авторами конструкция подводного датчика в принципе не отличается от предложенной нами. Аналогичные описания даются в работах [89, 105]. Иная кон-

Рис. 3. Спектрограммы морских осадков (а), чистой (б) и загрязненной (в) морской воды. Левая шкала относится к левой части кривой, правая — к правой



струкция с использованием бесконечной ленты для волочения по дну датчика, выполненного на нескольких твердотельных полупроводниковых детекторах вместе с обеспечивающей их работоспособность охлаждающей системой, описана в работе [104]. Описанный в работе [80] гамма-спектрометр для непрерывной съемки имел подводный датчик с внешним диаметром 127 мм и позволял проводить непрерывную регистрацию урана (радия), тория и калия. Загрузки в каналах были на уровне 40—200 имп/с. Исследования проводились у побережья Йоркшира на глубинах до 200 м с использованием кабеля-буксира длиной 850 м при скорости движения судна 3—4 узла.

Непрерывная гамма-спектрометрия проводилась при нижнем уровне дискриминации 0,05 МэВ, спектрометрия калия — в интервале 1,3—1,5 МэВ, урана (радия) — в интервале 1,66—1,86 МэВ, тория — в интервале 2,3—3,3 МэВ и фиксировались в цифровой и аналоговой записи. Результаты съемки

подробно освещены в [99]. Видимо, недостаточность статистики привела к увеличению интервала спектрометрии урана (радия) с 1,65 до 1,95 МэВ. Подсчет импульсов в урановом и ториевом каналах проводился за каждые 500 с. Местоположение судна фиксировалось через 10 мин, так что сопоставление смены литолого-стратиграфических границ и их спектрометрического отображения выполнено вполне корректно. Однако определение уран-ториевого разделения по каналам базировалось на измерениях, проведенных в лаборатории на модели с точечным источником, а не по данным изучения проб исследуемого района. Отмечается дифференциация в интегральном канале, сопоставимая со сменой коренных пород морского дна.

В принципе, непрерывная подводная гамма-спектрометрия может быть выполнена с применением любого скважинного спектрометра. Существенными являются подбор достаточно эффективного СБД и надежность соединения подводного контейнера с кабелем-буксиром. Оптимальным вариантом является четырехканальный (интегральный, калиевый, урановый и ториевый каналы) спектрометр, выполненный на базе СБД, состоящего из скинтилляционных монокристаллов диаметром 120 и высотой 150 мм. В этом случае внешний диаметр подводной гильзы может быть порядка 155 мм, что не вызовет дополнительных методических трудностей по сравнению с использованием датчиков МОРС.

Конструирование оболочки датчика для СБД на монокристаллах диаметром 150 и высотой 150 мм на ФЭУ-49 (см. рис. 2, з) потребовало специальных расчетов и предварительных методических проработок, что будет показано ниже. В этом случае проведение измерений связано с исследованием динамики поведения аппаратурных контейнеров на дне, особенно при работах на больших глубинах.

Конструктивное выполнение и динамика поведения аппаратурных контейнеров на дне

При проведении непрерывной подводной гаммаметрии необходимым условием получения достоверной информации является устойчивый контакт подводного контейнера — датчика гамма-излучения с исследуемыми донными образованиями. Поскольку в пределах шельфа глубины вод не превышают, как правило, 300 м, а скорость движения судна 3—8 узлов (1,5—4 м/с), применение динамических заглубителей оказывается малоэффективным. К тому же применение их требует дополнительного оборудования судна траловой лебедкой, грузовой стрелой и т. д. Вытравливание слишком длинного кабеля (со значительным превышением высоты водного столба) также не приводит к желаемым результатам. Длина кабеля должна быть оптимальной, так как, волочась по дну, кабель интенсивно

истирается и часто выходит из строя. Последнее может привести к отрыву датчика. Наиболее удачным является заглубленные датчика гамма-излучения с помощью дополнительных носовых и кормовых утяжелителей, которые крепятся непосредственно к контейнеру датчика и обеспечивают наилучшие условия проведения судна по профилю в условиях изменяющихся глубин моря мелководных прибрежных районов.

Расчет утяжелителей производится по известной методике определения гидродинамического сопротивления и утяжелителя типа «тяжелой цепи», достаточно хорошо зарекомендовавшей себя в практике морских работ. Рассмотрим движение цилиндрического контейнера, имеющего внешний диаметр $d=150$ мм, длину $L=1250$ мм, на глубине $h=100$ м со скоростью $v=3\div 8$ узлов.

Водоизмещение контейнера в кг

$$W = \frac{\pi d^2}{4} L \gamma = \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} 12,5 \cdot 1 = 22, \quad (6)$$

где γ — плотность воды.

При массе $G=50$ кг отрицательная плавучесть $P=28$ кгс.

Сопротивление движению контейнера складывается из гидродинамического сопротивления и силы трения контейнера датчика о грунт.

Гидродинамическое сопротивление (Q).

$$Q = C_{x\rho} (v^2/2) S, \quad (7)$$

где коэффициент сопротивления при движении $C_x=1,06$ при $S=\pi D^2/4$ [14].

Для использования таблицы равновесия тяги троса в потоке определяется параметр $K=P/q$ (q — сопротивление элемента, ориентированного нормально к потоку). Применяя кабель-трос КОБД-6 (диаметр 9 мм, масса 0,255 кг/м), получим

$$q = C_{x\rho} \frac{v^2}{2} d = 1,8 \cdot 51 \cdot 9,55 \cdot 0,009 = 7,88 \text{ кг/м} \quad (8)$$

и

$$K = 0,255/7,88 = 0,0324, \quad (9)$$

где ρ — массовая плотность воды.

При $K=0,04$ и $q=6,38$ кг/м, $v=5,5$ узла = 2,8 м/с гидродинамическое сопротивление подводного контейнера — датчика гамма-излучения

$$Q = C_{x\rho} \frac{v^2}{2} S = 1,06 \frac{102 \cdot v^2}{2} \frac{0,0225}{4} = 0,96v^2. \quad (10)$$

При $v=2,8$ м/с и $Q=7,4$ кгс сила трения о грунт

$$F_{\text{тр}} = P\psi, \quad (11)$$

где P — отрицательная плавучесть; ψ — коэффициент трения контейнера о грунт.

Эти данные табулированы для грунтов различных типов (табл. 9).

Принимая $\psi=0,6$, получаем силу трения $F_{тр}=16,8$ кгс. В итоге общая сила сопротивления перемещаемому по данному грунту контейнеру не превышает 25 кгс. Таким образом, этой

Таблица 9

Коэффициенты трения покоя гильзы

Грунты	ψ
Глина (ил)	0,20—0,42
Глина с песком	0,30—0,40
Песок	0,40—0,46
Галька	0,45—0,47

величиной может быть определен порядок силы T_0 , приложенной на ходовом конце кабеля-буксира КОБД-6 для глубин 100 м при скорости движения судна 5,5 узла.

Как видно из проведенного расчета, гаммаметрия шельфа в пределах указанных глубин может проводиться с использованием небольших маломощных судов, которые не требуют специально оборудованных причалов и сравнительно недороги при эксплуатации.

Расчеты кабеля по методу «тяжелой цепи». Определив отставание X и длину Y кабеля-троса в случае, если на его ходовом конце не приложено никакой силы, получим $Y=462$ м, $X=451$ м при глубине воды 100 м (рис. 4).

В случае когда на ходовом конце приложено усилие 25 кгс, направленное горизонтально в сторону, противоположную движению судна, получим $Y=384$ м, $X=375$ м и $T=106$ кгс.

Проведенный расчет показывает, что упрощенный вариант имеет некоторую погрешность при определении значений Y и X . Поэтому были просчитаны зависимости $X=f(v)$ и $Y=f(v)$ в диапазоне скоростей от 3 до 8 узлов. Кабель-трос располагался в потоке по прямой с критическим углом $\alpha_{кр}$ к потоку (см. рис. 4). При проведении непрерывной подводной гаммаметрии эти значения наиболее применимы. Путем добавления на ходовом конце к кабелю-тросу или к корпусу контейнера подводного датчика отрезка тяжелой цепи можно уменьшить

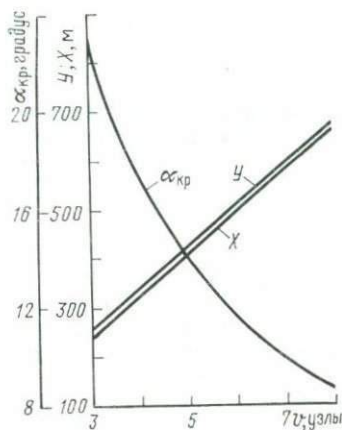


Рис. 4. Зависимость отставания X и длины кабеля-буксира Y при критических значениях угла $\alpha_{кр}$ в диапазоне скоростей v от 3 до 8 узлов

длину Y и отставание X . Сопоставление результатов показывает, что введение груза 100 кгс уменьшает отставание с 462 до 370 м и длину кабеля-троса — с 477 до 385 м. Параметры кабеля не оказывают существенного влияния на Y и X ; более существенно влияние массы. Введение груза $G=300$ кгс уменьшает отставание с 462 до 241 м и длину с 477 до 269 м.

Наиболее целесообразной формой корпуса для глубоководного сцинтилляционного датчика на ФЭУ-49 и монокристалле $NaI(Tl)$ размером 150×150 мм следует признать цилиндрическую с полусферическими доньшками. Такая конструкция проста, удобна для работы, и при этом обеспечиваются допустимые напряжения в области наиболее опасного сечения — сопряжения цилиндра с доньшками. Кроме того, необходимо отметить, что сферические оболочки, цилиндры без подкреплений и со шпангоутами относятся к числу наиболее исследованных форм прочных корпусов аппаратов, работающих на высокое наружное давление. При расчете прочности такого корпуса наибольшее внимание необходимо уделить расчету цилиндрической его части.

Таблица 10

Площади сечения шпангоута ($см^2$)
для глубины 1000—3000 м

Толщина оболочки, см	Шпация, см	Материал	
		Алюминиевый сплав	Сталь
1,0	6,04	1,4*	7,1
1,1	6,23	0,63*	5,08
1,2	6,60	—	4,06
1,3	6,88	—	2,84
1,4	7,14	—	1,78
1,5	7,40	57,2	0,74
2,0	8,53	34,1	—
2,5	9,11	23,9	—
3,0	10,45	7,0	—

* Глубина 1000 м.

Расчет прочности корпуса осуществляется по теории тонких оболочек. Согласно этой теории, толщина стенки оболочки, работающей на наружное давление, определяется при условии, что напряжение в середине пролета между шпангоутами не превышает определенной доли от текучести материала σ_T . В нашем случае эта величина принимается равной $0,85 \sigma_T$. Затем, зная расстояние между шпангоутами (шпация) и площадь сечения шпангоута (табл. 10), проводят проверку оболочки на устойчивость. Расчет шпангоутов ведется в том же порядке.

Величина расчетного давления выбирается с запасом в 1,2 раза, т. е. корпус для глубины 1000 м рассчитывается на давление 120 кгс/см², для глубин 3000 м — на давление 360 кгс/см². Исходя из размеров сцинтилляционного блока детектирования, для предварительных расчетов были взяты следующие величины: диаметр цилиндра — 300 мм, длина его — 600 мм. При выборе материалов для изготовления корпуса датчика, учитывая специфику работы с проникающим гамма-

излучением, предпочтение отдавалось материалам с меньшей весовой плотностью. Поэтому в первую очередь исследовалась возможность использования алюминиевых сплавов, имеющих плотность 2,65—2,8 г/см³. Широко используемые в настоящее время в судостроении алюминиевые сплавы имеют удовлетворительные механические характеристики (предел текучести $\sigma_T = 1800$ кгс/см²).

Значения толщины оболочки, рассчитанной по напряжениям для изделия из алюминиевого сплава, показаны в табл. 10.

Таблица 11

Параметры оболочек датчиков

Параметры	Глубина, м	
	1000	3000
Толщина оболочки, см	1,2	1
Шпация, см	15	10
Площадь сечения шпангоута, см ²	2	2,75
Напряжение в середине пролета между шпангоутами $\sigma_c \leq 0,85\sigma_T$, кгс/см ²	1530	5100
Критическое давление для оболочки $p_{кр} > p_p$, кгс/см ²	266	505
Напряжение в шпангоуте $\sigma_{ш} \leq 0,55\sigma_T$, кгс/см ²	990	3300
Критическое давление для шпангоута $p_{кр} \geq 1,3p_p$, кгс/см ²	188	606

Примечание. p_p — расчетное давление.

В ней же для сравнения приведены данные для оболочки, выполняемой из стали, имеющей $\sigma_T = 4000$ кгс/см².

Толщина оболочки может быть уменьшена за счет применения более прочных материалов. Лучшим материалом для изготовления датчика на глубины 3000 м следует считать титановые сплавы, обладающие более высоким пределом текучести, до $\sigma_T = 6000$ кгс/см² и $E = 1,1 \cdot 10^6$ кгс/см².

Не останавливаясь на численном расчете, в табл. 11 приведем окончательные данные по двум вариантам корпуса для глубины 1000 м из алюминиевого сплава и для глубины 3000 м из титанового сплава. Следует отметить, что при расчете этих корпусов получился некоторый запас по устойчивости, в то время как по напряжениям были взяты предельные значения.

Конструкции корпусов обеих оболочек приведены на рис. 5, а и б.

Конструкция оболочки датчика для сцинтилляционного блока детектирования на монокристалле NaI(Tl) размером 150×150 мм и ФЭУ-49 выполняется из алюминиевого сплава на расчетное давление $p_p = 240$ кгс/см² (глубина 2000 м).

Спуск и подъем датчика и передача импульсов осуществляются по кабелю КРК-2. Для проведения достоверных измерений с глубоководным датчиком необходимо оценить стабильность его поведения на дне.

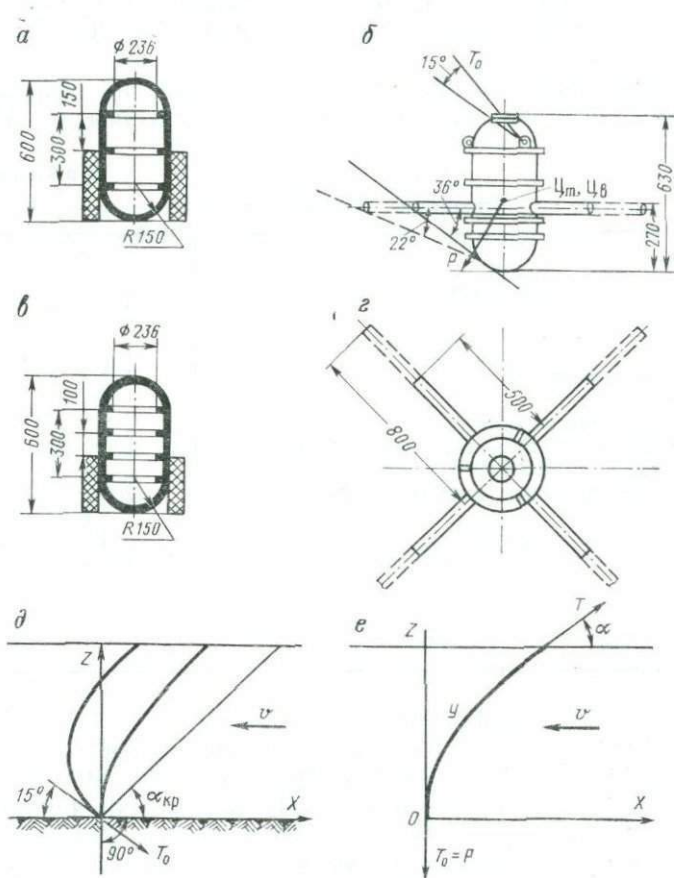


Рис. 5. Конструкции корпусов (а, б) и схемы расчетов опрокидывающей силы глубоководного контейнера (б, е), кривой кабеля-буксира при перемещении судна (д) и на течении (е)

При установке датчика на грунт и при последующем перемещении судна усилие в кабеле-тросе вблизи оболочки датчика может изменяться, вследствие чего возможны опрокидывание оболочки с датчиком и дрейф контейнера по дну. При выполнении расчетов поведения датчика на течениях используется методика расчета тяжелого троса в потоке. Эта методика позволяет установить форму кривой троса (длина Y , снос X , глубина Z) и усилие T в зависимости от скорости течения v ,

начальных и конечных углов троса относительно скорости v , геометрических и весовых характеристик троса. Для предварительного расчета исходные величины скорости придонных течений были приняты 1,3 узла в диапазоне глубин, где эти скорости существенно не изменяются, до 500 м.

Натяжение на ходовом конце у оболочки датчика определяется как геометрическая сумма

$$T_0 = \sqrt{(P - p)^2 + Q^2}, \quad (12)$$

где P — отрицательная плавучесть оболочки с датчиком; Q — гидродинамическое сопротивление корпуса; p — подъемная гидродинамическая сила.

Подсчитав момент указанных сил относительно точки закрепления кабеля-троса, можно определить угол наклона оболочки. Он оказывается небольшим, не превышая 3° (отклонение от вертикали).

На основании изложенного была выбрана схема расчета сноса датчика на течении (рис. 5, д, е) для следующих вариантов: 1) заглубление оболочки 500 м, течение со скоростью 1,28 узла действует равномерно по всей глубине, натяжение $T_0 = 500$ кгс (вариант со свинцовым коллиматором-утяжелителем); 2) заглубление оболочки 2000 м, течение действует равномерно в поверхностном слое 500 м, натяжение $T_0 = 939$ кгс с учетом массы свинца и 1500 м кабеля-троса, имеющего отрицательную плавучесть 399 кгс; 3) заглубление оболочки 500 м, общая масса ее 100 кг, отрицательная плавучесть 34 кгс; 4) заглубление оболочки 500 м, общая масса 150 кг, отрицательная плавучесть 84 кгс. Результаты расчета приведены в табл. 12.

Таблица 12
Положение кабеля при сносе

Варианты	Z, м	X, м	Y, м	T, кгс
1	500	56	510	630
2	2000	28	2005	1074
3	500	303	590	180
4	500	210	550	235

При использовании оболочки с датчиком в районах с сильными придонными течениями наблюдается значительный снос по направлению течения. При этом происходит изменение начальных условий, по которым производится анализ формы кри-вой кабеля-троса. Кроме того, судно не может практически находиться в одной точке и каким-то образом перемещается. Представляет интерес выяснить, насколько необходимо увеличить длину кабеля-троса, чтобы оболочка с датчиком не испытывала перемещения при изменении местоположения судна в заданном радиусе. Этот вопрос может быть решен следующим образом. Определяются два крайних положения судна по направлению течения и против него (см. рис. 5, д). Численный расчет показывает, что если длину кабеля-троса увеличить с

590 до 635 м (на 45 м) и с 550 до 635 м (на 85 м), то судно сможет перемещаться вверх по течению на 90 и 183 м соответственно. При такой свободе маневра вероятность проведения достоверной спектрометрии на станции (без отрыва датчика от дна) увеличивается (см. рис. 5, е).

Так же были определены масса и плавучесть корпуса датчика и положение центра тяжести Ц_T и центра водоизмещения Ц_B (см. рис. 5, б). Центры тяжести и водоизмещения, как показал расчет, находятся достаточно близко друг от друга.

Для обеспечения остойчивости датчика на грунтах, имеющих наклон к горизонту до 20° , предусмотрены дополнительные грузы, размещаемые на штангах. При длине штанг до 350 мм величины дополнительных грузов находятся в пределах 19—39 кг, при длине 650 мм — от 4 до 14 кг.

На основании проведенных исследований возможно определение некоторых эксплуатационных характеристик датчиков, а также обеспечение оптимальных условий по геометрии глубоководной гамма-спектрометрии морских осадков *in situ* на глубинах до 2,5 км.

Методика и техника исследований на типовых плавсредствах и на автомобиле-амфибии

Проведение работ на намеченных к изучению участках шельфа сводится к трем этапам. На первом этапе выполняются разбивка и закрепление опорной сети. Если исследования проводятся в сугубо прибрежной зоне, то на берегу устанавливаются базовые и текущие реперы и створные знаки. В море устанавливаются базовые и временные вехи, о чем сообщается в Гидрографическую службу. На втором этапе выполняются подготовка и градуирование аппаратуры, гаммаметрия морского дна, отбор проб и спектрометрия пород дна в наиболее интересных точках профиля. Третий этап состоит из полевых и лабораторных анализов, предварительной камеральной обработки и проведения по этим данным необходимых дополнительных исследований.

Подготовка к выполнению морских исследований заключается в оборудовании судна измерительной ядерно-геофизической и вспомогательной аппаратурой. При работах на исследовательских судах среднего тоннажа (водоизмещение 100—1500 т) размещение на них аппаратуры производится по разрешению капитана судна и в соответствии с требованиями «Регистра СССР». В таких случаях судовые службы (штурманская, машинная и др.) обеспечивают проведение радиометрических исследований. Затем осуществляется плановая привязка и намечается порядок отработки профилей, регламентируется порядок проведения исследований и отбора проб с точки зрения безопас-

ности судовождения и личной безопасности научно-исследовательского и судового персонала.

Как правило, оборудование судов производится индивидуально и зависит от их типа и водоизмещения. Для большей оперативности и согласованности действий на профилях исследований пульт регистрации, самописец МОРС и стойка анализатора СГС-1 вместе с основной обеспечивающей аппаратурой устанавливаются в непосредственной близости от ходового мостика (рубки). Размещение основной и вспомогательной аппаратуры всегда должно обеспечивать проведение оптимального комплекса исследований.

Работы, проведенные экспедициями Института океанологии АН СССР на побережье Балтийского моря, и исследования ВНИИЯГГ на Балтийском и Японском морях показали, что одним из оптимальных вариантов проведения исследований в прибрежной зоне являются работы с использованием автомобилей-амфибий.

Рассмотрим порядок проведения работ с автомобиля-амфибии. Во время первого этапа на исследуемом участке берега через определенные интервалы, нормально к береговой линии выставляются попарно створные знаки. Интервалы между створами определяются задачами исследований. Каждый намеченный створ для сопоставимости данных при повторных исследованиях жестко фиксируется на местности стационарными, желательно металлическими, реперами и связывается теодолитными ходами с остальными. Вся сеть створов привязывается к Государственной триангуляционной сети или к реперу надежного ориентира (маяку, трубе промышленного предприятия и т. п.), имеющего отметку на топографической (морской) карте, используемой в период полевых работ в качестве основы.

Автомобили-амфибии (рис. 6) не боятся отмытых участков, способны самостоятельно выходить на берег при наличии достаточно плотного грунта, могут брать на борт большое количество аппаратуры, снаряжения и людей (до 1500 кг) и при этом обладают еще и некоторыми мореходными качествами. Все это позволяет при строгом и неукоснительном соблюдении специальных правил техники безопасности быстро, дешево и надежно проводить с помощью автомобилей-амфибий широкий комплекс поисковых исследований в прибрежной зоне моря и в бухтах.

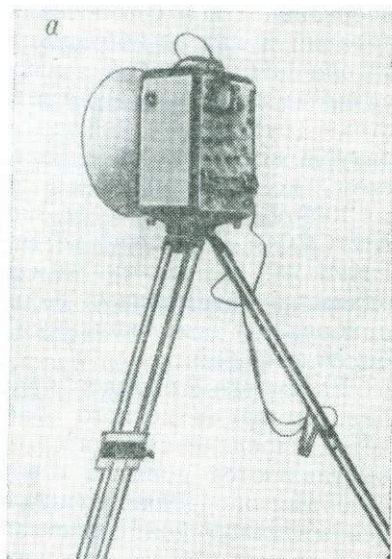
Для достижения указанных целей на амфибиях были установлены и, согласно морским условиям работ, жестко закреплены ядерно-геофизические приборы, источники питания, оборудование для морских геологических работ и спасательные средства. В элементы конструкции машины были внесены необходимые изменения.

Энергопитание аппаратурного комплекса осуществляется двояко: бортовой электростанцией — приборов, работающих на

переменном токе (СГС-1, МОРС), и аккумуляторами — потребителей постоянного тока (эхолоты, радиодальномеры, радиостанции и т. п.) (рис. 7). В трюме амфибии был оборудован

Рис. 6. Оборудование автомобиля-амфибии для проведения исследований в море.

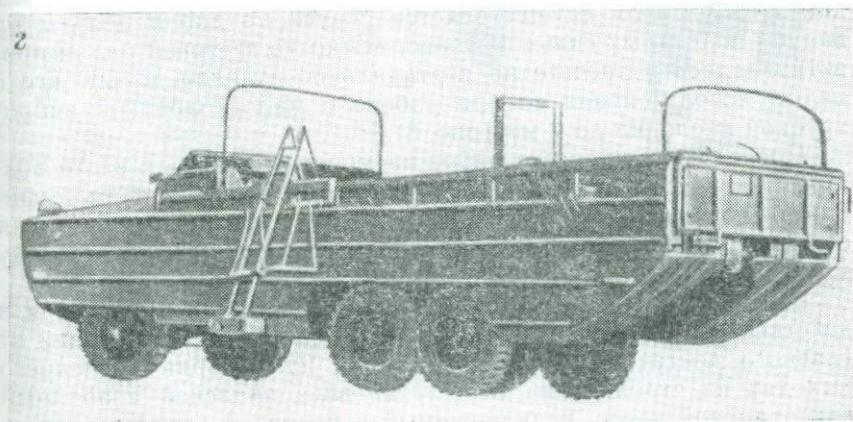
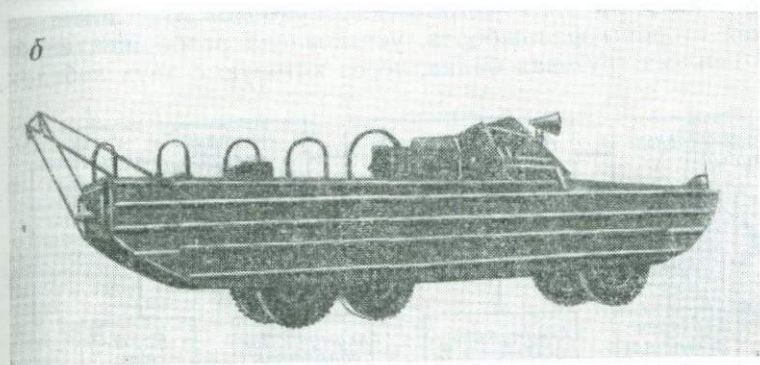
а — береговой комплект радиодальномера; амфибия; *б* — с кормовой балкой для кабеля подводного датчика МОРС или СГС-1, *в* — на профиле в море, *г* — с эхолотом.



специальный отсек, в котором с помощью установленного в нем выпрямителя можно было произвести подзарядку аккумуляторов для работы аппаратуры или амфибии.

Управление энергосистемами машины (как ходовой, так и аппаратурной) осуществлялось механиком-водителем и оператором с единого пульта управления, смонтированного в рубке. Для одновременной оперативной отметки на самописцах всех

приборов, в целях последующего сопоставления результатов во времени и пространстве, на пульте имеется реле времени, которое может срабатывать автоматически через определенные



промежутки времени, либо при активном вмешательстве оператора.

Для постоянной связи с берегом или с параллельно работающими плавсредствами в рубке установлена ультракоротковолновая радиостанция. Определение положения амфибии производилось с помощью комплекта радиоэлектронных дальномеров для чего один из них, выступающий в роли «ответчика», на по-

сылаемые с суши сигналы берегового комплекта радиодальномера (рис. 6, а), был установлен на борту амфибии (рис. 6, в).

На корме амфибии, на внутренней стороне откидной части фальшборта грузовой платформы, находится кассета с подводными контейнерами радиометрических приборов. Здесь же, но с внешней стороны фальшборта, установлена разборная, снабженная блоками грузовая балка, через которую с двух лебедок

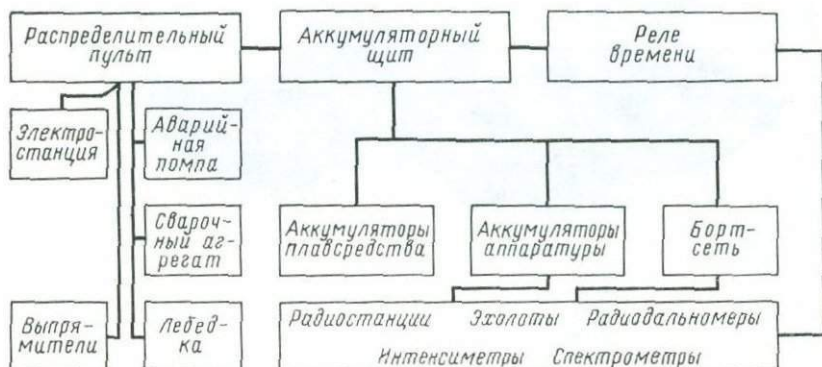


Рис. 7. Схема пульта управления автомобиля-амфибии

кабелем-буксиром осуществляется спуск на дно и подъем на палубу подводных гильз. Грузоподъемность грузовой балки проектировалась в расчете на вертикальное усилие до 500 кгс с целью использования ее при работе с малогабаритной вибротрубкой (колонка до 2 м) (рис. 8).

Поскольку в процессе работ на морских разрезах часто возникает необходимость якорных стоянок, в носовой части амфибии было предусмотрено специальное приспособление для отдачи и выбирания якоря с приводом на механическую лебедку машины.

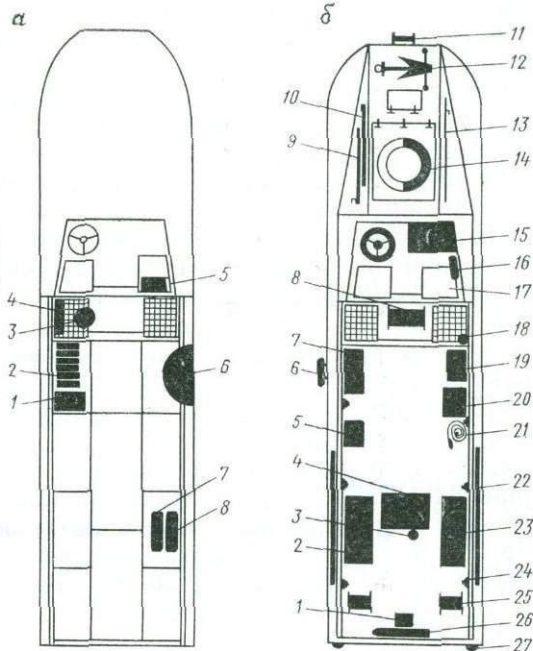
Ввиду того что водоотливные помпы амфибии приводятся в действие при помощи трансмиссионной системы, работающей от главного двигателя, и, следовательно, при аварии последнего выходят из строя, нами был установлен запасной аварийный водоотливной насос, подключаемый к бортовой электростанции, что позволяет производить откачку воды из трюма в случае выхода из строя главного двигателя.

Практика полевых работ, связанных с применением такого сложного механического комплекса, показывает, что очень часто возникает необходимость проведения ремонтно-сварочных операций. Поэтому в комплект снаряжения амфибии включен портативный сварочный аппарат, позволяющий при необходимости быстро устранить повреждения корпуса или механические неисправности вспомогательного оборудования.

На основании требования техники безопасности на борту амфибии имелся комплект спасательного снаряжения, в который входили: надувной плот, спасательные жилеты, спасательные круги, радиостанция, ракетница с запасом красных ракет, а также трехдневный неприкосновенный запас воды и продовольствия.

Рис. 8. Схема размещения аппаратуры и оборудования на автомобиле-амфибии.

а — аварийное снаряжение, расположенное в трюмах амфибии: 1 — электросварочный аппарат с зарядным устройством для аккумуляторов, 2 — аккумуляторы аппаратуры, 3 — водяная помпа, 4 — запас автола, 5 — комплект инструмента, 6 — запасной баллон, 7 — запас технической воды и ИЗ, 8 — запас бензина; *б* — схема расположения оборудования и аппаратуры на амфибии: 1 — радиодальномер, 2 — спасательные средства, 3 — огнетушитель, 4 — электростанция, 5 — грунтоотборник, 6 — забортное устройство эхолота, 7 — эхолот, 8 — механическая лебедка, 9 — якорный крюк, 10 — заводная ручка, 11 — якорное устройство, 12 — якорь, 13 — багор, 14 — спасательный круг, 15 — пульт управления, 16 — радиостанция, 17 — место оператора, 18 — огнетушитель, 19 — СГС-1, 20 — МОРС, 21 — контрольный ручной лот, 22 — разобранная грузовая балка, 23 — контейнер для образцов и буйреперов, 24 — электророзетка, 25 — геофизическая лебедка, 26 — подводный контейнер радиометра и спектрометра, 27 — упор стояка грузовой балки



Для привязки профилей на местности был использован высокоточный геодезический радиодальномер, состоящий из трех станций, каждая из которых может работать в режиме «ведомой» и «ведущей». Станции размещаются на концах измеряемых линий. Между конечными пунктами необходима прямая видимость.

Подготовка радиодальномеров к работе заключается в наладке их и тарировании. Для высокоточных измерений расстояний проводится градуировка модулирующих частот. Эти работы выполняются до начала и по окончании работ, а также при появлении сомнений в неизменности частот. Проверка основной частоты 10 МГц производится путем сравнения ее с одной из высокостабильных частот 5, 10, 15 или 20 МГц, излучаемых в определенное время различными радиостанциями. Сравнение производят при помощи радиоприемника достаточной чувстви-

тельности, имеющего собственный частотный диапазон и второй гетеродин.

Для получения грубых отсчетов выполняются последовательно пять замеров на пяти частотах. Отсчет времени проводится по смене индикаторных фигур на экране фазового индикатора.

Для замеров над водной поверхностью до относительно неподвижного объекта нет необходимости делать полный комплекс высокоточных измерений, вводить показатель преломления и учитывать погодный фактор, так как вполне приемлемо изменение расстояний с точностью ± 10 м (длина амфибии). При измерении расстояния над водной поверхностью до движущегося объекта на нем следует устанавливать «ведомую» станцию. В целях уменьшения влияния воды на распространение радиоволн «ведущую» станцию необходимо поднимать на максимально возможную высоту.

Преимуществом радиодальномеров является возможность измерения линии через небольшие препятствия, в любое время суток, в туман и несильный дождь, проведение измерений расстояний от 150 м до 35 км с точностью ± 5 см ($\pm 3 \cdot 10^{-6}$ от измеряемого расстояния). Радиодальномер обеспечивает непрерывную двустороннюю радиотелефонную связь.

Промерные работы при проведении гаммаметрии осуществляются с помощью эхолотов разных моделей, широко используемых в гидрографической и морской геолого-геофизической практике. Эхолоты рассчитаны на питание от аккумуляторных батарей или буферной системы питания напряжением 24 ± 2 В. Потребляемая электрическая мощность при номинальном напряжении не превышает 120 Вт. Они выдерживают непрерывную 12-часовую работу без выхода за пределы необходимой точности измерений при соблюдении нормального теплового режима. Запись глубин производится непрерывно и автоматически на ленту самописца и гарантирует необходимую точность измерений при скорости хода судна до 12 узлов, волнении моря до 3 баллов, и бортовой качке до 10° . Интервал глубин, фиксируемый эхолотами, 0—300 м. Максимальная точность измерений на малых глубинах $\pm 1\%$, на больших $\pm 2\%$ от измеряемой глубины.

Применявшиеся нами эхолоты позволяли получать весьма детальные, хорошо читаемые профили, вполне удовлетворяющие требованиям современного прибрежно-морского геолого-геофизического комплекса исследований при нефтегазопонсковых работах и поисках современных россыпей прибрежно-морского генезиса. Необходимо отметить, что смонтированная на базе амфибии плавучая лаборатория позволила нам приобрести необходимые навыки при отработке морских разрезов для исследований на современные прибрежно-морские россыпи Балтийского и Японского морей.

Изучение гамма-поля района работ на акваториях начинается

с обработки рекогносцировочной сети профилей. На этом этапе исследований изучаются среднефоновые значения естественной интенсивности гамма-излучения донных грунтов, конфигурации зон различной интенсивности гамма-поля, ее величина и возможная связь с геологическим строением морского дна, проводятся промеры глубин с помощью эхолотов и первичная геологическая документация. Желательно проведение исследований по изучению зависимости отраженных от дна импульсов от литологического состава донных образований. Данные эхометрии фиксируют смену пород различного вещественного состава как следствие изменения акустической жесткости донных грунтов и дают дополнительные сведения об осадках по осциллографическому анализу отраженного от дна ультразвукового импульса. Одновременное проведение гаммаметрии и эхометрии с одного судна позволяет повысить достоверность геолого-геофизической интерпретации результатов исследований, а также привлечь дополнительный материал о мезорельефе морского дна.

При работах в прибрежной зоне береговые окончания профилей отмечаются парой створных знаков. Удаление от берега фиксируется радиодальномером. Коррекция отклонения от курса при выполнении мористого окончания профиля производится по телефонному каналу радиодальномера. Судовым комплектом контролируется также равномерность прохождения судна по профилю. Последняя определяется циклическим изменением во времени индикаторной фигуры на экране электронно-лучевой трубки радиодальномера. Удаление от берега фиксируется в 1—2-минутном сеансе связи с береговой станцией, находящейся в створе, и контролируется дополнительным сеансом связи с радиодальномером, установленным на соседнем створе.

Как показал анализ топопривязки при проведении работ на Каспийском и Азовском морях в случае равномерного прохождения судна по профилю, достаточно иметь привязку точек начала и конца профиля. Через эти точки и проводится прямая. При таком построении характер гамма-поля практически не искажается. При необходимости срочно закончить работы на профиле или для закрепления характерной (аномальной) точки эти точки профиля отмечаются выбрасыванием реперного буя.

Опыт работ [69] показывает, что в течение светового дня при применении надежного кабеля и достаточно мореходного судна гаммаметрия может быть выполнена на профилях общей длиной 100 км.

На сцинтилляционных датчиках с монокристаллами NaI(Tl) размером 80×80 мм и ФЭУ-52, ФЭУ-56 и др. можно получить чувствительность порядка $35\text{--}60$ (имп·с⁻¹)/(мкР·ч⁻¹). При средних фоновых значениях порядка $2,5\text{--}3$ мкР/ч дифференциация записи составляет $20\text{--}30$ имп/с, что должно в 3 раза превышать ошибку наблюдений. Выраженная в процентах от скорости сче-

та при величине интегрирующей ячейки 2, 4, 8 и 16 с относительная ошибка будет, соответственно, около 4, 3, 2,1 и 1,2%, что составит 6, 4,5, 3 и 2 имп/с. На основании изложенного для производства съемки величина интегрирующей ячейки τ радиометра определена 4, 6 или 8 с. При рекогносцировочных исследованиях она может быть выбрана равной 2 с. Максимальные

значения $\tau = RC$ используются для контрольных и поверочных полевых и стационарных замеров и при градуировке радиометров. Поскольку скорость движения датчика на профиле колеблется в пределах 2,5—3,5 м/с, интегрируются значения естественной радиоактивности с линейных величин порядка первых десятков метров, т. е. тех же значений, что и невязка радиогеодезических методов.

Корабль, используемый при радиометрических исследованиях морского дна, должен быть приспособлен как для работы

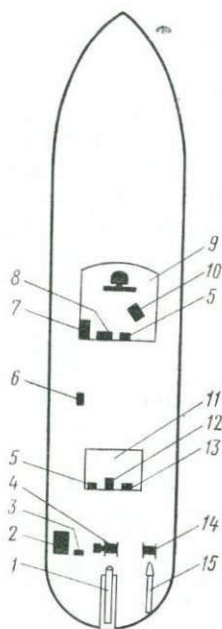


Рис. 9. Схема расположения оборудования и аппаратуры на малотоннажном исследовательском судне.

1 — вакуумная трубка для отбора проб грунта; 2 — бензоэлектрический агрегат АБ-4Т/230; 3 — вакуумный насос; 4 — лебедка с электрическим приводом для спуска и поднятия вакуумной трубки; 5 — громкоговорящее переговорное устройство; 6 — преобразователь ПО-550; 7 — радиостанция; 8 — эхолот ПЭЛ-3; 9 — ходовая рубка; 10 — локатор; 11 — аппаратная; 12 — самонирующий регистратор И-361; 13 — пульт радиометра и спектрометра; 14 — лебедка с кабелем КОБД-4; 15 — подводный датчик

в мелководной прибрежной зоне, так и в условиях открытого моря. Он должен иметь хорошие мореходные данные, малую парусность и осадку, большую остойчивость и достаточную вместимость для размещения научного персонала, основного и вспомогательного оборудования. Предлагаемая схема расположения оборудования и аппаратуры на корабле приводится на рис. 9.

Когда сетка створов разбита и нанесена на рабочие планшеты, переходят к работе на морских разрезах, состоящих из повторяющихся на каждом створе трех последовательных операций: предмаршрутной подготовки, непрерывного маршрута (от берега) и прерывистого маршрута (к берегу).

Предмаршрутная подготовка заключается в приведении аппаратуры и вспомогательного оборудования и снаряжения в рабочее состояние. Во время непрерывного маршрута производится промер глубин и измерение гамма-активности донных грунтов.

Для сопоставления ленты МОРС с лентой эхолота на них наносятся марки времени. При работе с радиодальномером роль

марок времени выполняют моменты изменения индикаторной фигуры. На лентах отмечается также длина вытравленного кабеля-буксира и параметры, характеризующие скорость движения по профилю. На ленте МОРС фиксируют глубины начала и конца профиля по данным эхолота, а также характерные изменения рельефа дна (5—7 точек на профиле). Если рельеф дна ровный, отметки глубин совмещаются с марками времени. На мористом окончании непрерывного маршрута делается якорная стоянка, являющаяся первой из отмеченных буй-реперами станций, совокупность выполняемых работ на которых составляет обратный прерывистый маршрут. На станциях прерывистого маршрута проводятся спектрометрия естественного гамма-излучения донных грунтов, отбор донных проб и определение координат станций.

Исследование энергетического спектра естественного гамма-излучения осуществляется с помощью скважинного гамма-спектрометра СГС-1, приспособленного для морских работ. Перед началом замеров производится контрольная градуировка шкалы спектрометра с помощью стандартных гамма-источников. Затем гильза с датчиком спектрометра опускается на дно и в течение 30 мин проводится набор спектра. В это же время при помощи радиодальномерной пары определяется расстояние до берегового репера, на котором установлен дальномер, и отбираются для последующих лабораторных анализов пробы грунта. Замер по радиодальномеру проводится каждой станцией пары в режиме «ведомой» и «ведущей», и переход на следующую точку осуществляется после того, как расхождение результатов оказывается в пределах допустимой погрешности.

Отбор проб производится в точках экстремального значения гамма-поля. Для этого используются дночерпатели, вибропоршневые трубки, струги и другие средства. Проба (поверхностная или в интервале глубин 0—30 см) отбирается с таким расчетом, чтобы масса ее в сухом состоянии была 3—4 кг. Первичная геологическая документация осуществляется сразу после отбора пробы. Проба этикируется и подготавливается к лабораторным анализам.

Иногда при проведении рекогносцировочных исследований вместо серии профилей, ориентированных нормально к береговой линии, гаммаметрия может проводиться непрерывно по косым профилям (вдольбереговая змейка). В этом случае переход с одного профиля на другой выполняется без подъема датчика на борт судна. Тогда при выполнении циркуляции (поворота) скорость судна плавно увеличивается до максимальной. После окончания маневра и выхода на начало следующего маршрута скорость резко снижается. Это делается для того, чтобы датчик сначала всплыл над дном и при выполнении циркуляции не касался его, для уменьшения возможности обрыва датчика. При резком снижении скорости датчик по инерции плавно опуска-

ется на дно. Для страховки к датчику до начала работ крепится буй на прочном капроновом фале. Длина фала должна превышать максимальную глубину в районе исследований на 10—15 м, но не меньше 10% глубины.

В последние годы в отечественной и зарубежной литературе появились сообщения о первых экспериментах по отбору проб донных грунтов на мелководных участках морей с помощью вертолетов. У берегов Аргентины [106] для сбора проб грунтов использовали два вертолета, оборудованные специальными пробоотборниками. Глубина воды лимитировалась длиной кабеля (25 м). Точки отбора проб фиксировались судовой радарной системой. Для взятия пробы вертолет либо садится на воду, либо зависает над водой. Время отбора лимитируется необходимой навеской грунтов и емкостью пробоотборника. В описываемом случае в течение 7 мин отбирались две пробы. При отборе проб с судна за 24 ч обрабатывалось 36 станций по сетке 5×5 миль из расчета стоянки 15 мин и скорости перехода около 12 узлов. За то же время по сети 10×10 миль было отработано 23 станции. Использование одного вертолета позволило выполнить 59 станций в сутки (по сети 5×5 миль) или 41 станцию (10×10 миль). Кроме получения экономического эффекта, значительно расширяются методические возможности для проведения работ в опасных для судов и амфибий зонах сильного прибоя, вблизи рифов, в районах рыхлых наносных мелей, баров, пересыпей и т. п. Еще более заманчивые перспективы открывает использование вертолетов при исследованиях дна мелководья арктических морей [12]. В этих условиях за счет разрежения арктического воздуха высота зависания увеличивалась с 4 до 10 м. Среднее время отбора пробы с глубины моря 1,5 м незначительно превышало полутораминутный интервал для сбора 3,5 кг пробы (в среднем сухом весе).

По-видимому, серьезного внимания заслуживает применение вертолетов (наряду с амфибиями) в качестве носителей аппаратуры для физических исследований труднодоступных и опасных зон.

Приемы обработки и интерпретации результатов съемки

Обработка данных гаммаметрии начинается с представления записи, выполненной в аналоговой форме (в импульсах в секунду), в единицах мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Задаваясь априорно неизменяющейся геометрией изменения по профилю, однородностью спектрального состава гамма-излучения, пренебрегая влиянием эманации радона, можно считать мощность дозы линейной функцией концентрации естественных гамма-излучателей. Дополнительные погрешности будут обусловлены использованием сцинтилляционных детек-

торов. Известно, что пластические и кристаллические сцинтилляторы имеют значительный «ход с жесткостью», некоторый разброс энергетических порогов и анизотропию пространственных характеристик. Поэтому необходимым условием корректности проводимых поверочных работ и эталонировок является постоянство спектрального состава гамма-излучения и геометрии измерений при проведении исследований и эталонировании аппаратуры. На практике это соблюдается не всегда, и поиски наиболее приемлемого варианта еще не завершены.

При расчетах мощности дозы по модели с объемным источником была оценена измеряемая интенсивность при углублении гильзы с датчиком в рыхлые донные осадки, при резкой смене литолого-фациальных разностей, слагающих морское дно, либо при их выходе на морское дно в виде узкой полосы, ограниченной с двух сторон [69].

Задавая направление движения гамма-квантов в полярных координатах через радиусы-векторы и нормаль, проходящую через центр сцинтиллятора (рис. 10), определяем эффект на детекторе в зависимости от влияния высоты водяного столба D , мощности наносов H_{II} и породы H_{II} и их коэффициентов ослабления μ_n , μ_{II} , μ_{II} . Расчет проводится по [11] от элементарного объема dV в полярных координатах с углами θ и φ .

Обозначив через $G(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$ вклад фотонов, имеющих апертуру в интервалах углов от θ до $\theta + \Delta\theta$ и от φ до $\varphi + \Delta\varphi$, будем иметь общий эффект на детектор [59]

$$G = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi G(\theta, \varphi) = \int_{-1}^1 d(\cos\theta) \int_0^{2\pi} d\varphi G(\theta, \varphi), \quad (13)$$

где $G(\theta, \varphi)$ — функция, описывающая угловое распределение.

Пренебрегая рассеянием, рассмотрим потоки излучения, пересекающие детектор и поверхность дна. Поверхностная плотность источников излучения определится как:

$$\beta = \frac{\rho}{\mu_n} \cos\theta e^{-\frac{\mu_{II} H_{II}}{\cos\theta}} \left(1 - e^{-\frac{\mu_n H_{II}}{\cos\theta}} \right). \quad (14)$$

В случае если наносы отсутствуют (имеют место условия $H_{II} = 0$ и $H_{II} \rightarrow \infty$),

$$\beta = (\rho/\mu_n) \cos\theta, \quad (15)$$

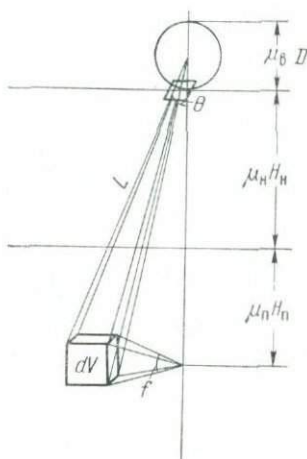


Рис. 10. Схема расчета эффекта на СБД [11]

где $1/\mu_{\text{п}}$ — может быть определено как средняя эффективная глубина излучающего поверхностного слоя.

При расположении излучающих источников у поверхности (свыше 95% гамма-излучения исходит от верхних 25—30 см) и $\cos(\vec{L}, \vec{n}) = 1$ будем иметь

$$dI = K \frac{\rho \cos \theta}{\mu L^2} e^{-\mu L} dG, \quad (16)$$

где $(\cos \theta/L^2) dG$ — элемент телесного угла, стягивающего площадку.

В условиях проведения непрерывной подводной радиометрической съемки, когда $e^{-\mu L}$ имеет усредненные значения, для общей интенсивности регистрируемого излучения в пределах исследуемого участка

$$I = K \mathfrak{M} e^{-\mu L} \omega, \quad (17)$$

где $\mathfrak{M} = \rho/\mu$ — поверхностная плотность источников излучения; ω — полный телесный угол.

При принятых нами условиях изотропии детектора и отсутствия поглощения ($e^{-\mu L} \rightarrow 1$)

$$I = K \mathfrak{M} \omega. \quad (18)$$

Как видно, задача сводится к нахождению телесного угла, под которым из точки регистрации виден периметр участка.

Во многих случаях телесный угол для прямоугольной излучающей поверхности рассчитывается аналитически. Различные положения детектора над прямоугольником могут быть приведены к положению детектора над центром прямоугольника путем несложных преобразований. Принимая выбор координатной системы, как это описано в [59], определим телесный угол как функцию $\tau(\epsilon, \eta)$:

$$\omega = \tau(\epsilon, \eta). \quad (19)$$

Функция $\tau(\epsilon, \eta)$ табулирована для значений $\epsilon \leq 1$ и $\epsilon \geq 1$, графики ее приводятся в [59].

Изучение вариаций интегральных величин телесного угла при проведении непрерывных подводных радиометрических исследований особенно интересно в следующих случаях:

1) при углублении гильзы с датчиком радиометра в рыхлые донные грунты наблюдаемая интенсивность

$$I = 4\pi K \mathfrak{M} - 2K \mathfrak{M} \theta = I' \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right); \quad (20)$$

2) при резкой смене литолого-фациальных разностей, слагающих морское дно,

$$I = 2K \mathfrak{M} \left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) = I' \left(1 + \frac{2\theta}{\pi}\right); \quad (21)$$

3) при выходе на морское дно узкой полосы, ограниченной с двух сторон,

$$I = 2K\mathfrak{M}\theta = I' \left(\frac{\theta}{2\pi} \right). \quad (22)$$

Подобные элементарные решения могут быть получены для других практически встречаемых при исследованиях взаимоположения детектора и излучающих поверхностей.

При оценке гамма-поля, создаваемого донными образованиями, используются модели плоского и объемного источников. Этим расчетам посвящены многочисленные исследования [11, 36, 65 и др.]. Результаты многих из них дают численные значения, поскольку решение задачи сводится к интегралам, не берущимся в элементарных функциях. Так, О. И. Лейлунский, В. Б. Новожилов и В. Н. Сахаров [30], рассматривая плоский изотропный источник как сумму отдельных изотропных точечных источников с постоянной поверхностной плотностью активности и представляя закон поглощения для каждого отдельного источника в экспоненциальной форме, находят

$$\begin{aligned} I(E_0, r_0, h) &= \int_S \frac{\sigma K dS}{4\pi l^2} = \int_h^{l_0} \sigma \frac{e^{-\mu_0 l}}{4\pi l^2} 2\pi l dl = \\ &= \frac{\sigma}{2} [-E_i(-\mu_0 h) + E_i(-\mu_0 l_0)], \end{aligned} \quad (23)$$

где $I(E_0, r_0, h)$ — интенсивность излучения E_0 на высоте h над центром кругового плоского источника радиусом r_0 ; K — коэффициент излучения в веществе; σ — поверхностная плотность активности; E_i — табулированная функция $-E_i(-x)$; S — площадь источника; $l_0 = \sqrt{r_0^2 + h^2}$ и $l dl = r dr$.

Идея, предложенная Ю. П. Булашевичем [11], позволяет упростить решение путем сведения объемных источников излучения к поверхностным.

Если мощность наносов, перекрывающих породы дна, невелика, то расчет может быть проведен в двухслойной геометрии. Если мощность наносов не превышает 8 см или же они отсутствуют (области развития отрицательной седиментации), расчет значительно упрощается. В этих случаях необходимо оценить также величину телесного угла, которым стягивается периметр рассматриваемого участка из точки регистрации. Расчет может проводиться для двух полубесконечных сред (вода—грунт) с учетом влияния наносов. Для вычисления мощности дозы необходимо учитывать влияние коэффициента ослабления излучения в осадках и фактора накопления. В работе [50] определение фактора накопления проводится путем сравнения двух «крайних» случаев, в одном из которых линейные коэффициенты ос-

лабления для грунта рассчитываются по массовому коэффициенту ослабления для воды, а в другом — для алюминия. По этим схемам расчета фактор накопления для грунта берется соответствующим водной или алюминиевой среде. Показывается, что результаты расчетов функции полной мощности дозы, проведенных по этим двум схемам, не показывают существенного расхождения при $D=0$ при энергии источника не ниже 0,5 МэВ. На близких расстояниях от поверхности грунта ($D \sim 0$) следует отдавать предпочтение схеме расчета на основе алюминия. В области малых D в интервале энергий от 0,5 до 3 МэВ функция полной мощности дозы зависит от энергии первичного гамма-излучения настолько слабо, что для практических расчетов ею можно пренебречь. Резкая зависимость мощности дозы от первичного излучения лежит в области энергий, меньших 0,5 МэВ, достигая максимальных значений при энергиях 80—100 кэВ.

Результаты исследований радиоактивности донных грунтов с целью изучения геологии морского дна изображаются в виде схем или карт естественной радиоактивности исследуемого участка. В случае когда необходимо получить первичную информацию об обширном районе или в силу различных причин (невозможность безопасной проводки судна, неблагоприятный рельеф морского дна) непрерывная гаммаметрия невозможна, следует ограничиться проведением исследований по заранее намеченным точкам наблюдений. Так были исследованы районы акватории у восточного побережья Каспия на участке мыс Сегенды — Казахский залив и в районе банки Жданова. В первом случае расстояние между станциями составило 3—8 миль, во втором — 400—500 м [69]. В окончательном варианте результаты наносятся на топографический планшет в виде карт естественной радиоактивности с изолиниями в мкР/ч.

Контроль за работой аппаратуры (радиометров, спектрометров, эхолотов, радиодальномеров) выполняется также неоднократно повторением жестко закрепленных буями или вехами характерных маршрутов.

Сопоставление данных полевых и лабораторных ядерно-физических определений, батиметрии и геологических факторов позволяет проводить качественную интерпретацию применительно к решению общих геологических задач, поискам унаследованно развивающихся антиклинальных структур и современных прибрежно-морских россыпей на шельфе методами гаммаметрии. Невозможность проведения количественной интерпретации заставляет искать выход в комплексировании гаммаметрии и других физических методов для привлечения дополнительной информации. Рассмотрим кратко некоторые применяемые методы.

В первую очередь следует остановиться на тех методах, которые имеют сходную природу и, соответственно, аппаратурно-методические решения. Это — ядерно-геофизические методы,

позволяющие оценить плотность или степень консолидации морских донных отложений. В работе [71] описывается использование гамма-гамма-метода для просвечивания широким пучком колонки донных отложений непосредственно в грунтовой трубке сразу же после ее подъема на борт судна. Обеспечивая непрерывную протяжку образца в поле гамма-излучения источника на основе тарировочной зависимости регистрируемого уровня интенсивности от плотности осадков, авторы четко идентифицируют отдельные слои мощностью больше 1 см с точностью измерения объемной массы осадков не ниже 0,04 г/см³.

Исследование ослабления узкого пучка гамма-излучения на борту судна в колонке отобранной со дна моря пробы позволило авторам [97] оценить пористость осадков по количеству находящейся в них воды. Полученные значения Z/A (Z — атомный номер, A — атомная масса) (табл. 13) для ряда минералов в осадках носят скорее исследовательский, чем поисковый, характер.

Другим информативным методом может явиться термометрия современных морских осадков. Исследование связей геотемпературного поля с погребенными структурами было начато еще в 40-е годы [4]. Возможность применения непрерывных методов измерения и регистрации температуры и теплового потока в современных морских осадках позволяет комплексировать методы при наличии зондов-термоградиентографов совместно с радиометрами и (или) спектрометрами.

Количественные оценки возможных аномалий температур и теплового потока показывают, что при различной глубине залегания интересующих нас объектов в донных осадках создаются аномалии температур и теплового потока, намного превышающие погрешность измерений. Так, аномалии температур оцениваются величинами от десятых долей градуса до единиц градусов (и даже до десятков градусов в случае разгрузки термальных вод, наличия грязевого вулканизма и т. п.) при инструментальной точности измерений абсолютных температур 0,01° С и относительных температур 0,001° С. Аномалии теплового потока составляют от 20—30% до нескольких сотен процентов при погрешности его определений 3—10%. Технически проведение терморазведочных работ на шельфе вполне осуществимо, так как сейчас для этого имеются и разрабатываются различные средства подводной разведки (вибропоршневые, пороховые и

Таблица 13

Отношения Z/A для воды
и минералов в осадках [97]

Состав	Z/A
Вода	0,5551
Каолинит	0,5036
Монтмориллонит	0,4994
Кварц	0,4993
Ортоклаз	0,4958
Кальцит	0,4996
Магнетит	0,4751

гидрореактивные трубки), которые быстро проникают в осадки до глубин 10—15 м. Возможно, что величина теплового потока через породы морского дна связана с их геологическим строением [4].

Развитие сейсмических методов морской разведки, в том числе акустического сейсмопрофилирования, широко отражено в научно-технической литературе. Достаточно освещено также применение при исследованиях морского дна гравиметрии, магнитометрии, электрометрии и аэрофотосъемки.

Исследования *in situ* пористости морских осадков путем измерения их электрического сопротивления описаны в работе [85]. Методически эта система сходна с приведенной в [83] и предназначена для установки на грунтовой трубке при изучении осадков. Электронизмерительная часть обеспечивает непрерывную регистрацию проводимости столба «вода—осадок», а электроды системы позволяют проводить замеры на небольших объемах осадков внутри грунтовой трубки и вне ее. Вывод информации осуществляется многоканальной телеметрической системой с частотной модуляцией до глубин, не превышающих 1600 м. По данным лабораторных измерений, точность определения пористости осадков оценивается $\pm 2\%$, что позволяет по измерениям сопротивления обнаруживать участки деформации образцов.

Среди работ по дистанционному определению физических свойств морских осадков необходимо отметить исследования по неконтактным измерениям электромагнитных параметров — магнитной проницаемости и электропроводности. Рассматриваемая авторами [29] электрически сбалансированная антенная система перемещается вблизи границы раздела вода — грунт. Электродвижущая сила, наводимая грунтом в приемной антенне, может рассматриваться как функция электромагнитных параметров грунта и геометрии измерений. Применение низкочастотного зондирования позволяет значительно уменьшить влияние диэлектрической проницаемости. Так как относительная магнитная проницаемость современных осадков незначительно отличается от проницаемости воды, основные соотношения, связывающие амплитуду и фазу принимаемого сигнала с изучаемыми параметрами неконсолидированных морских осадков, значительно упрощаются.

В чистой морской воде видимость не превышает нескольких десятков метров. В замутненных прибрежных водах она уменьшается до единиц и долей метров. На несколько сотен метров может проникнуть в воду излучение лазера, работающего в сине-зеленой части спектра. Проникающие характеристики ухудшаются при сдвиге в красную область спектра.

В последнее время резко расширилась область применения лазеров при подводных исследованиях [94]. Известны разработки лазерных систем для подводного наблюдения [117] на газо-

вых лазерах. С помощью такой системы изображение объекта в мутной воде (коэффициент пропускания 0,05) отчетливо распознается с расстояний, не превышающих пока 4,5 м.

Описанная в [116] гидроакустическая система подводного наблюдения основана на совместном применении методов ультразвуковой локации и акустической голографии. Расстояние до объекта определяется по времени задержки отраженного импульса. Изображение воспроизводится при освещении голограммы лучом гелий-неонового лазера. В результате испытаний удалось получить поперечную разрешающую способность 10 мм. Практическое использование таких систем для геологического исследования морского дна сдерживается их высокой стоимостью.

Гаммаметрия морского дна имеет свои преимущества и недостатки.

Основным достоинством метода является его объективность, достоверность, то, что он, как писал акад. А. Е. Ферсман, дает в руки исследователя тот диалектический метод, который требует в анализе всякого явления изучения связи его с другими, установления закономерностей, рассмотрения каждого явления как части единого большого природного процесса. Это особенно проявляется при интерпретации данных непрерывной подводной радиометрической съемки, где анализ гамма-поля проводится в теснейшей связи с общим геологическим строением, рельефом и неотектоникой дна, гидродинамикой, минералогическим и гранулометрическим составом донных грунтов, условиями их залегания в комплексе с данными других геофизических методов.

При проведении подводной гаммаметрии величина естественной радиоактивности фиксируется непрерывно по профилю исследований. Точность регистрации обуславливается аппаратурными и методическими факторами.

Несомненным преимуществом метода является возможность непрерывной телеметрии при передаче информации, что с использованием соответствующей аппаратуры может обеспечить получение данных о глубочайших впадинах Мирового океана, где давление воды делает непосредственное пребывание человека пока невозможным.

Использование при исследованиях спектрометрического варианта датчика и многоканального анализатора дает возможность получать информацию и о спектральном составе гамма-излучения донных грунтов *in situ*. Это позволяет проводить анализ по вкладам отдельных изотопов, в результате чего получается более ценная геолого-геофизическая информация о строении морского дна.

В процессе проведения исследований с помощью специальных контрольных узлов и приборов проверяется надежность работы надводных и подводных электронных блоков ядерно-

геофизической аппаратуры, возникающие неисправности могут быть своевременно обнаружены и устранены. Таким образом, в ходе исследований реализуется жесткий контроль за стабильностью и чувствительностью аппаратуры, что особенно необходимо в связи со спецификой подводных исследований. Смена блоков подводного датчика или надводного пульта управления и регистрации связана с повторением работ на профиле и находится в непосредственной зависимости от гидрометеорологических условий.

К числу недостатков следует отнести невозможность непосредственного контроля условий исследований. Известно, что геометрия опыта может существенно сказаться на результатах измерений. В случае непрерывных исследований ошибка будет наименьшей, а в случае дискретных замеров на станциях — наибольшей. Необходим точный учет аппаратурных погрешностей, которые могут значительно увеличивать систематические ошибки наблюдений и привести много случайных ошибок. Сведение ошибок до минимума достигается путем увеличения надежности аппаратуры и применения рациональной методики.

Некоторые недостатки обусловлены использованием кабеля-буксира как связующего звена между подводным контейнером и надводным пультом управления и регистрации. Длина кабеля лимитирует глубину проведения исследований, делая необходимым применение специальных конструкций для заглубления датчика. При больших глубинах исследований возрастает «парусность» кабеля, что влечет за собой снос глубинного контейнера с линии профиля, значительно усложняя привязку.

Малая величина интенсивности естественного гамма-излучения донных грунтов вызывает значительные трудности при проведении спектрометрических исследований, особенно при спектрометрической съемке в движении. Существенным недостатком является также малая глубинность метода — возможность получения информации лишь о верхнем 20—30-сантиметровом слое донных образований и отсутствие другого метода, который позволял бы получать подобную информацию для контроля и сопоставления данных гаммаматрии морского дна.

В заключение отметим еще два положительных фактора.

Первый фактор — это незначительная стоимость работ по сравнению с другими видами морских, а особенно подводных исследований. Затраты на производство исследований складываются из стоимости аппаратуры и оплаты судна, вспомогательного оборудования и средств привязки, расходов на содержание научно-исследовательского персонала. Оплата аренды судна при проведении комплексных исследований позволяет снизить величину этих затрат по каждому применяемому в комплексе методу соответственно. При проведении морских радиометрических работ на Азовском и Черном морях в 1966, 1967 гг. стоимость 1 км профиля гравиметровой съемки в три, а сейсмиче-

ской — в 15 раз превышала стоимость 1 км профиля гаммаметрии.

Второй фактор — это возможность комплексного применения гаммаметрии и других гидро- и геофизических методов исследований. Здесь можно отметить уже сложившийся на море комплекс — сейсмические, гравиметрические, магнитометрические, электрометрические, а также и термометрические методы. Совмещение в одном подводном контейнере нескольких датчиков даст возможность получать комплексные характеристики исследуемой среды. Проведение комплексных исследований позволит изучать современные осадки и изменение состава пород и условий их залегания на дне моря быстро, достоверно, экономически эффективно и с гораздо меньшим отбором проб донных грунтов, чем при применяемых ныне методах исследований, в результате чего будет получена объективная и достоверная предварительная информация о геологических процессах, происходящих на морском дне.

Поиски антиклинальных структур и решение некоторых геологических задач на шельфе методами гаммаметрии

Исследование естественного гамма-поля с успехом проводится при изучении состава пород по разрезу скважин и на дневной поверхности [2, 27, 54 и др.]. Энергетический состав естественного гамма-излучения различных геологических образований зависит, в основном, от состава и плотности изучаемой среды, расстояния между породой — источником гамма-квантов и детектором, а также от геометрии измерений. Исследование гамма-поля, проводимое с помощью спектрометров, позволяет не только качественно дифференцировать гамма-поля, но проводить их количественные оценки. Отображение строения пород осадочного чехла в гамма-поле поверхностного среза дает возможность получать достоверную предварительную информацию об их глубинном геологическом строении. Применение методов гаммаметрии позволяет проводить исследование подводного грязевого вулканизма, подводное геологическое картирование, изучать литодинамику приустьевых зон, выявлять унаследованно развивающиеся антиклинальные поднятия, а также трассировать зоны предполагаемых глубинных разломов.

Геологическая информативность современных морских осадков и ее отображение в гамма-поле

Проведение поисково-разведочных работ на акваториях шельфа носит специфический характер. Геологическая информация заключается в материалах морских геолого-геофизических исследований, в сравнительном геолого-структурном и палеотектоническом анализе близлежащей суши и дна акватории и в данных анализов отобранных со дна образцов. Специфика шельфа состоит еще и в том, что наряду со связями и закономерностями, установленными и изученными на суше, здесь появляются и начинают доминировать чисто морские законы образования и условия развития современных осадков.

Выполнение подводного геологического картирования осложняется невозможностью прямого детального описания текстурных и структурных особенностей донных образований. Поэтому проводится сбор большого количества образцов нужного объема и массы. Параллельно проводится подводное фотографирование,

аэрофотосъемка, региональная съемка с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Получение качественной информации в этих случаях зависит от прозрачности (мутности) воды, а при использовании ИСЗ и от благоприятных атмосферных условий. Несмотря на применение широкого комплекса различных методов исследований (геологических, геофизических, буровых, водолазных и пр.), данные подводного геологического картирования не имеют в большинстве случаев необходимой детальности и составление карт проводится путем экстраполяции, что не может не сказываться на их достоверности.

Поверхность морского дна в зоне шельфа — специфическая область, где в результате динамического равновесия происходит закономерное распределение осадков. Происходящая в процессе современного осадкообразования минералогическая и гранулометрическая сортировка находит четкое и достаточно контрастное отображение в интенсивности и спектральном составе гамма-поля донных грунтов.

Для нефтегазопонсковых работ на акваториях значительный интерес помимо прямого геологического картирования представляет изучение конседиментационных структур и грязевого вулканизма, а также их влияния на процессы современного осадкообразования.

Генетическая связь между нефтегазоносностью и грязевым вулканизмом, установленная И. М. Губкиным, а также очевидная роль процессов грязевого вулканизма и диапиризма в строении нефтяных и газовых месторождений Азербайджана ставят вопрос о возможности изучения гаммаметрией подводного грязевого вулканизма при проведении нефтегазопонсковых исследований на шельфе южной части Каспийского моря. И. М. Губкин писал, что диапировая структура, нефтяное месторождение и грязевой вулкан — это триединая сущность единого целостного процесса геологического развития области погружения и опускания Кавказского хребта. Из 300 известных на земле грязевых вулканов больше половины находятся в Азербайджане и в прилегающей к Азербайджану акватории Южного Каспия. Известны проявления грязевого вулканизма на Сахалине и в Крыму. С морскими грязевыми вулканами связаны месторождения нефти Апшеронского порога, Бакинского и Куринского архипелагов. История эксплуатации Локбатанского месторождения (близ Баку), к которому приурочен действующий грязевой вулкан (за последние 50 лет он извергался 9 раз), свидетельствует о том, что наличие грязевого вулкана на структуре не связано только с разрушением нефтяных и газовых залежей, но, наоборот, является их прямым поисковым признаком. Так, за время разработки Локбатанского месторождения из его недр добыто свыше 27 млн. т нефти и свыше 1 млрд. м³ газа. В пределах близлежащей акватории Южного Каспия на площадях развития грязевых вулканов открыты месторождения Нефтяные

Камни, банки Макарова, Сангачалы-море, острова Дуваный, Булла-остров, Булла-море и др. Значительная часть островов и банок в южной части Каспийского моря обязана своим происхождением грязевулканической деятельности, приуроченной к зонам сложного геолого-геофизического строения или крупных нарушений. Согласно нашим исследованиям, по работам А. О. Мартиросовой [34] и Р. А. Агамирзоева и Т. А. Золотовицкой*, отмечается повышенная радиоактивность глин грязевулканического происхождения на море и на суше.

Возможности гаммаметрии могут быть проиллюстрированы на примере исследований, проведенных в районе банки Макарова (рис. 11). Здесь в пределах подводного месторождения находится грязевой вулкан, испытавший сильное извержение в 1958 г. По оценке [114], энергия этого извержения равна $7 \cdot 10^{16}$ Дж и вполне сопоставима с энергией извержения крупнейшего вулкана Кракатау в 1883 г. — $2,1 \cdot 10^{17}$ Дж. Гаммаметрия выполнялась в этом районе совместно с электроразведкой на одном судне. Радиометрическими исследованиями была освещена сводовая часть антиклинальной структуры (рис. 11, а). В районе банки Макарова морские электроразведочные работы проводились незадолго до извержения 1958 г. и вскоре после него. Работы выполнялись дифференциальными установками (A_1MNA_2 и A_1MBA_2 с $MN=20$ м), что позволяет с большей четкостью выделить пласты и зоны, незначительно отличающиеся по своим удельным сопротивлениям от вмещающей среды. Результаты измерений представлены на рис. 11, б. Корреляционные линии четко обрисовывают кольцевую зону, оконтуривающую область распространения грязевулканических отложений. После крупного извержения вулкана в районе банки Макарова были выполнены повторные исследования с целью изучения изменений, происшедших во время извержения в районе кратера. Измерения, осуществленные с помощью тех же установок, показали, что после извержения заметно (примерно на 40%) увеличилась площадь, занятая грязевулканическими отложениями. При этом дополнительно к ранее отмеченным локальным зонам в северной части планшета были закартированы две аналогичные зоны в южной части участка. Помимо этого в северо-западной части выделился обширный участок сильно усложненной записи, совпадающий с зоной действующих грифонов и обильным выделением газа, что может быть объяснено возникновением после извержения протяженной трещины. Наличие промежуточных экстремумов на графиках $\Delta U/I$ внутри кольцевой зоны указывает на появление здесь крупных обломков и трещин [55].

По данным гаммаметрии морского дна здесь четко выявились три участка распространения грязевулканической брекчии,

* Устное сообщение.

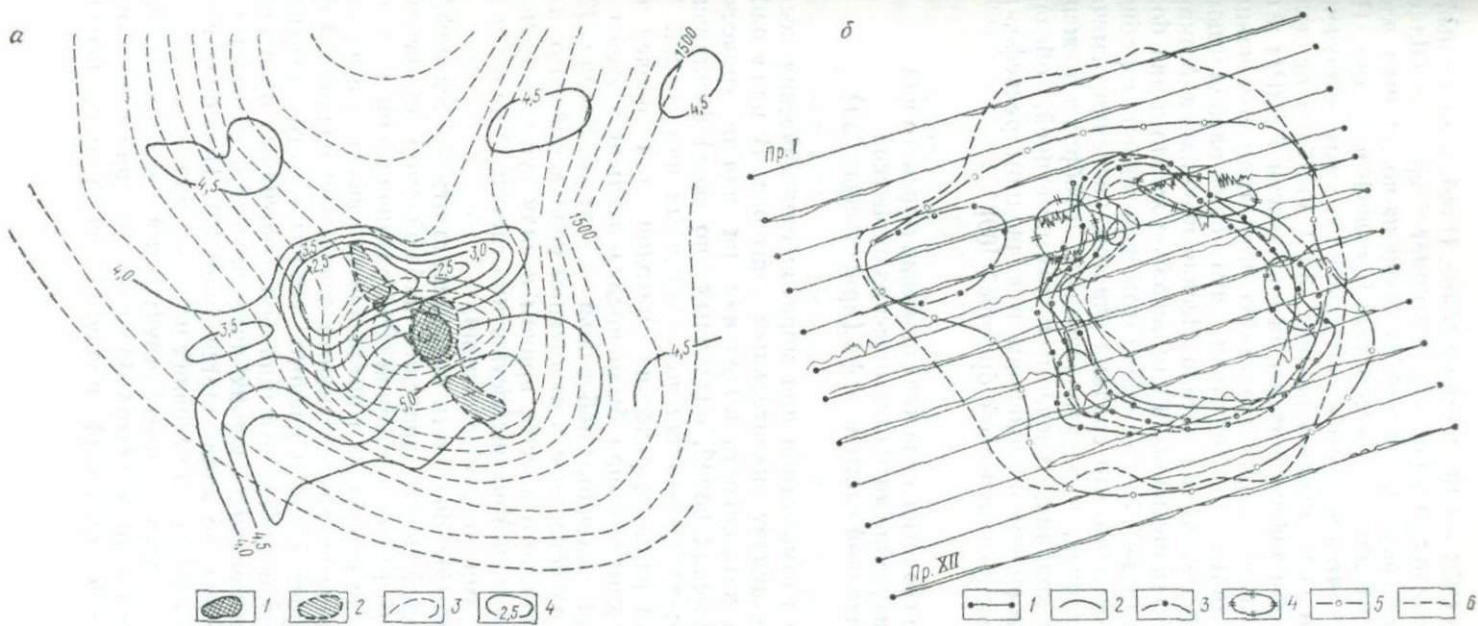


Рис. 11. Сопоставление результатов морских геофизических исследований в районе грязевого вулкана банки Макарова.

a — суммарный эффект гамма-поля структуры банки Макарова (стратоизогипсы по условному сейсмическому горизонту) и грязевулканической брекчии по данным радиометрии, а также результаты электроразведки (исследования 1958 г.): 1 и 2 — область распространения грязевулканической брекчии по данным соответственно электроразведки и радиометрии, 3 — стратоизогипсы, 4 — изогаммы; *b* — результаты электроразведочных и геоакустических исследований: 1 — профили съемок, 2 и 3 — линии корреляции по данным электроразведки соответственно в 1956 и 1958 гг., 4 — участки усложненной записи $\Delta U/I$ по данным электроразведки, 5 и 6 — граница распространения брекчии по данным соответственно электроразведки и геоакустики

имеющие общее ССЗ — ЮЮВ направление. Наиболее крупный — центральный участок, в плане он повторяет очертания области распространения грязевулканической брекчии по данным электроразведки. Два других — несколько меньшей площади. При среднефоновых интенсивностях естественного гамма-излучения донных грунтов исследуемого района 3—4 мкР/ч в пределах всех трех участков зафиксированы интенсивности 7 мкР/ч и более. Дать однозначную интерпретацию всем трем отмеченным участкам затруднительно. Учитывая, что они располагаются вдоль тектонической линии остров Песчаный — банка Макарова, можно их интерпретировать как основное жерло и два боковых грифона (сальзы). За это предположение говорит их общая ориентация. Возможно, что средний участок, уверенно отмечаемый и радиометрией, и электроразведкой, отображает жерло вулкана, а два крайних, отмечаемых гаммаметрией, обязаны своим происхождением понижениям в подводном рельефе, заполненным грязевулканической брекчией [69].

Прямое геологическое картирование морского дна и изучение литодинамических процессов мелководной части шельфа (приустьевых зон)

Применение гаммаметрии при морских геологических исследованиях представляет значительный интерес. В ряде работ была показана возможность выделения на радиометрических картах геологических полей, различных по своей фациальной характеристике; трассирования зон разрывных нарушений.

Возможности радиометрических методов для проведения геологического картирования были предварительно изучены на суше в пределах восточного побережья Южного Каспия [20]. Здесь выходят на поверхность отложения новокаспийского, хвалынского и бакинского ярусов, причем в силу существовавших климатических условий поверхность этих отложений не была затронута процессами почвообразования.

В исследуемом районе почти повсеместно отмечается дифференциация среднефоновых значений наблюдаемой интенсивности естественного гамма-излучения. Эти различия наиболее значительны там, где перепады в интенсивности связаны с литологическими границами, разделяющими отложения различной фациальной приуроченности и разного геологического возраста. В пределах распространения фациально однотипных отложений значительных изменений средних интенсивностей гамма-активности, как правило, не наблюдается (рис. 12). Подобное явление может иметь место и в условиях морского дна.

Для поисков антиклинальных структур в пределах Бакинского и Апшеронского архипелагов большое значение имеет установление контакта отложений продуктивной толщи, нередко

обнажающейся в сводах антиклинальных структур, с вышелегающими отложениями акчагыльского и апшеронского ярусов.

Работами ряда исследователей показано, что рельеф дна и положение береговой линии в исследуемом районе определяется геологическим строением подводного склона и гидродинамическим режимом водных масс, абрадирующих береговой склон. По данным аэрофотосъемки, в прибрежной полосе суши близ мыса

Сарыгая-Баши встречаются выходы мергелистых сланцев неогенового комплекса. Выходы этих отложений в море прослеживаются в виде полосы шириной 500—600 м к северу от мыса Сарыгая-Баши на расстоянии более 3,5 км. Восточнее поля развития этих образований на морском дне обнажаются выходы пород продуктивной толщи. Последние выполнены здесь кварцевыми песчаниками, типичными для фации продуктивной толщи Апшеронского полуострова [67].

Профиль 1 непрерывной подводной радиометрической съемки, проведенной нами в 1958 г. совместно с морской электроразведочной партией АЗНИИ по добыче нефти, был нацелен на отбивку контакта отложений продуктивной толщи, акчагыльского и апшеронского ярусов (рис. 13). Профиль был ориентирован по курсу ЮЗ—СВ в направлении островов Камни Два Брата. Направление профиля было выбрано вкrest предполагаемому положению геологических границ. Рельеф дна в этом месте был довольно спокойным, без резких перепадов глубин, подводных гряд, банок, камней и т. д. Глубина моря контролировалась судовым эхолотом и находилась в пределах 10—18 м, плавно увеличиваясь от концов к центральной части профиля.

Как показали исследования, областям развития на дне пород различных стратиграфо-литологических комплексов отвечают разные уровни естественной радиоактивности донных образований. В области развития апшеронских отложений наблюдаются значения 5—6 мкР/ч. Отложениям века продуктивной толщи

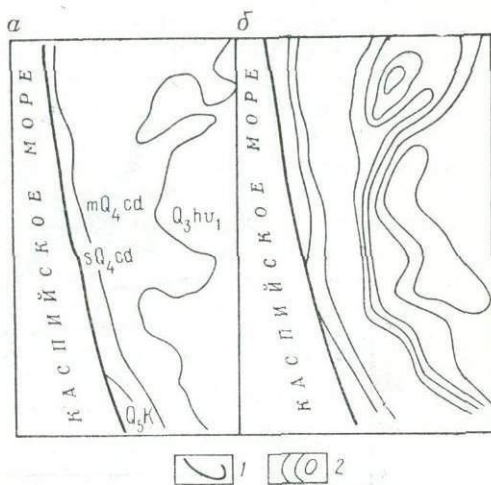


Рис. 12. Схема сопоставления геологического строения (а) и естественной радиоактивности (б) участка на восточном побережье Каспийского моря [20].

1 — береговая линия; 2 — изолинии интенсивности и границы распространения отложений: Q_3K — современного Каспия, sQ_4cd — золотых и mQ_4cd — морских новокаспийского яруса, Q_3hv_1 — пролювиально-аллювиальных хвалынского яруса

отвечают интенсивности около 3 мкР/ч. Отложения акчагыльского яруса не получили четко выраженной радиометрической характеристики вследствие незначительной мощности их выхода. Участок кривой интенсивности гамма-излучения, приуроченный к полосе выходов отложений акчагыльского яруса, представляет собой средние значения при переходе от одного уровня записи к другому.

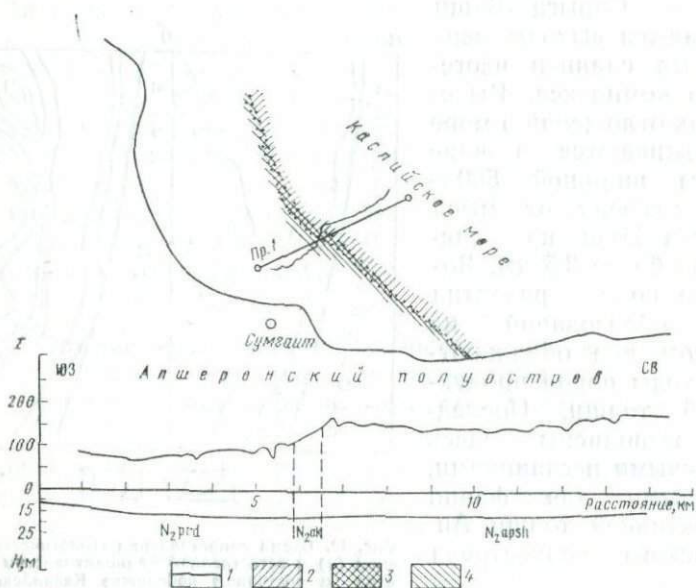


Рис. 13. Схематическое строение района работ [67] и профиль 1 [69] подводного картирования.

1 — береговая линия; выходы отложений: 2 — продуктивной толщи (N_{2prd}), 3 — акчагыла (N_{2ak}), 4 — апшерона (N_{2apsh}). I — в отн. ед.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными А. О. Мартиросовой [34, 35]. Проведенные ею исследования (более 2000 образцов из различных стратиграфических подразделений восточного Азербайджана) также показали повышенную естественную радиоактивность акчагыльских и апшеронских отложений против уровня радиоактивности отложений продуктивной толщи в Прикаспийском районе. Причиной этого предполагается большая глинистость акчагыльских и апшеронских отложений, обогащенность их тонкими фракциями.

Результаты проведенных исследований могут служить основанием для постановки гаммаметрии с целью геологического картирования морского дна. На первом этапе было бы целесообразным проводить трассирование геологических границ от тех мест, где они установлены, с помощью бурения. В этом случае

достоверность их определения не вызовет сомнений. Проверку их следует производить контрольным бурением в характерных точках с отбором образцов, проведением гамма-каротажа, гидроакустики и аэрофотосъемки.

Изучая основные черты процесса механической седиментации в Каспийском море, Н. М. Страхов [61] подразделяет их на три генетически легко различимых типа. К первому он относит мелкоалевритовые осадки в приустьевых частях крупных рек, впадающих в Каспий; ко второму — пятна пелитовых осадков вдоль побережья Среднего Каспия в районе Апшерона, обусловленные локальными тектоническими депрессиями; к третьему — тонкозернистые осадки Красноводского залива, участков, прилегающих к острову Огурчинского, заливу Кара-Богаз-Гол и северо-восточной части Каспийского моря. Приустьевые пятна тонкозернистых осадков были исследованы дважды — в 1963 и в 1965 гг. близ устья Куры на Каспийском взморье. Сносимые водами реки илистые частицы интенсивно окрашивают морскую воду, так что по ее цвету становится возможным определение границы распространения в прибрежной части моря речной муты и границ между морской (чистой) и мутноватой (смесью), а также между мутноватой и мутной (речной) водой, в которой содержится максимальное количество взвесей. К востоку от границ выпадения взвесей глубины моря постепенно увеличиваются, а далее к юго-востоку они резко возрастают.

Как показали результаты наблюдений, проведенных нами совместно с сотрудниками Управления гидрометеорологической службы АзССР, границы распространения содержащихся в речной воде механических взвесей обуславливаются господствующими ветрами и морскими течениями (рис. 14). По наблюдениям А. Н. Цицарева (УГМС АзССР), выполненным в 1963 г., отмечается положение гидрофронтов во время трехсуточного шторма (рис. 14, а), северных ветров (рис. 14, б) и северо-восточных ветров силою до 5 баллов (рис. 14, в). В штормовую погоду границы размываются и проследить их не представляется возможным.

Гаммаметрия, проведенная в районе Куринского взморья (рис. 14, д и е), показала существование полей различной интенсивности естественной радиоактивности донных грунтов. При интерпретации материалов съемки данные приводятся в границах зон значений: а) зона максимальных значений — 6 мкР/ч и более; б) зона высоких значений — 4,5—6 мкР/ч; в) зона повышенных значений — 3—4,5 мкР/ч; г) зона фоновых значений — 3 мкР/ч и ниже. По мере удаления от устья величина естественной радиоактивности донных грунтов падает. Это находится в прямой зависимости от изменения величины естественной радиоактивности образцов от их глинистости.

При исследованиях 1963 г. одновременно на профилях съемки проводился ультразвуковой анализ донных грунтов. На ис-

следующей площади амплитудный коэффициент отражательной способности донных грунтов варьирует в пределах 0,07—0,23 (рис. 14, *г*). Характер поля в общих чертах повторяет основные закономерности ветровых и радиометрических распределений. На величину амплитудного коэффициента отражения, по-види-

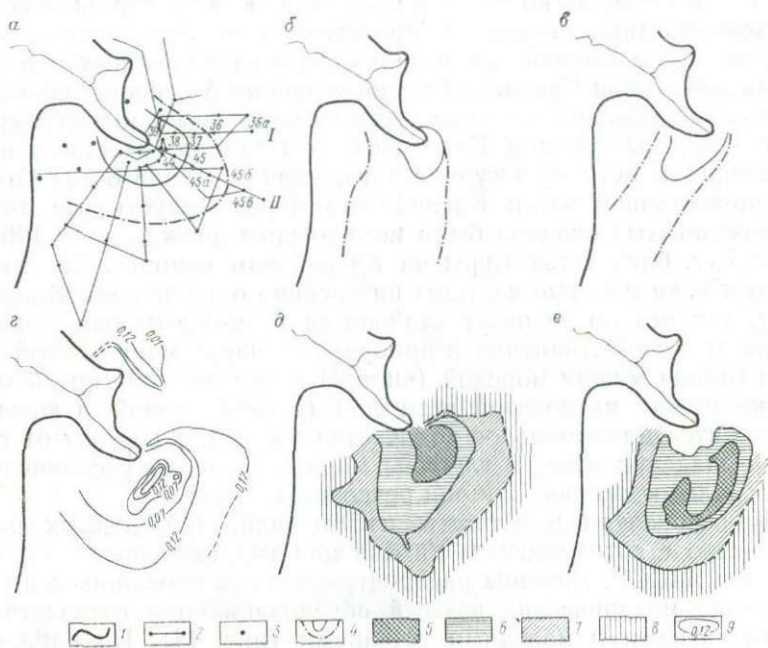


Рис. 14. Радиометрические исследования в устье Куры [69].

Положение гидрофронта: *a* — во время трехсуточного штиля, *b* — при северных ветрах силой до 5 баллов, *в* — при северо-восточных ветрах силой до 5 баллов; *г* — распределение амплитудного коэффициента отражения (съемка осенью); естественная радиоактивность донных грунтов: *д* — летом, *е* — осенью. 1 — береговая линия; 2 — профили радиометрической съемки; 3 — гидрологические станции; 4 — положение гидрофронтов; зоны значений интенсивности естественного гамма-излучения морских осадков: 5 — максимальных; 6 — высоких; 7 — повышенных; 8 — фоновых; 9 — изолинии амплитудного коэффициента отражения

мому, значительное влияние оказывает процесс седиментации, сказывающийся в неравномерности обводненности грунта, уменьшающий плотность осадка и ухудшающий отражательные способности донных грунтов.

Осенью 1965 г. здесь же была проведена спектрометрия естественного гамма-излучения современных морских осадков *in situ*. Исследования проводились по станциям, расположенным, в основном, на профилях съемок прошлых лет. Полученные спектрограммы (рис. 15, *a* и *б*) свидетельствуют о доминирующем вкладе гамма-излучения калия в общем спектре естествен-

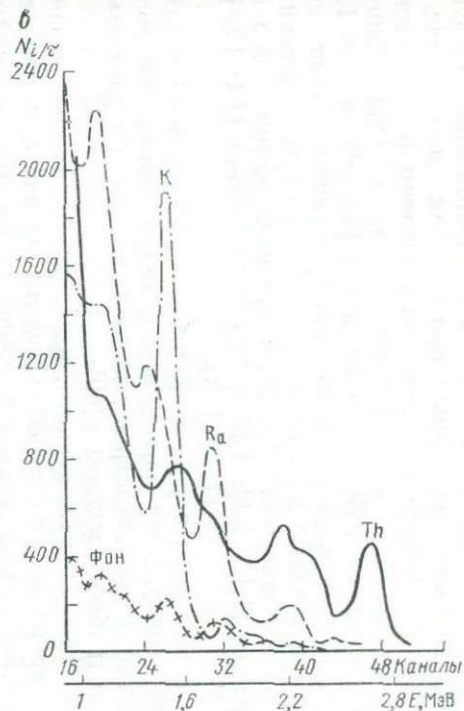
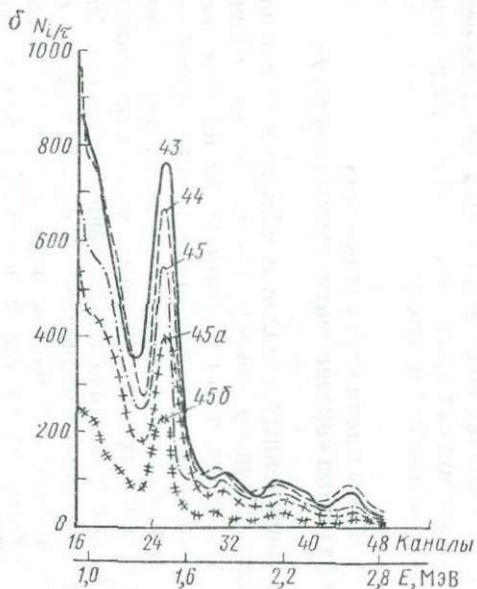
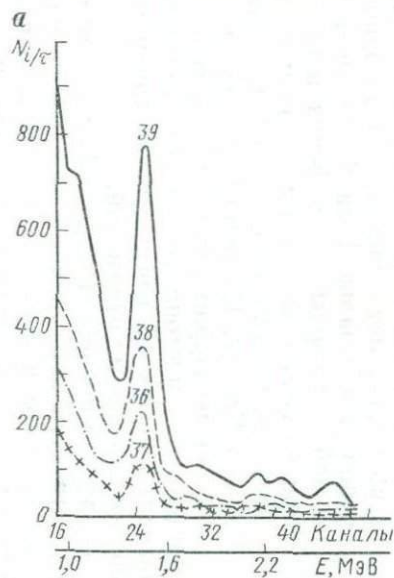


Рис. 15. Спектрограммы естественного гамма-излучения донных грунтов Куринского взморья [69]:

a — по профилю I (см. рис. 14, *a*), *б* — по профилю II, *в* — на моделях K, Ra, Th и фоновая

ного гамма-излучения. Идентификация фотопиков проводилась согласно данным, полученным при работах на моделях. Для этих работ были использованы эталоны радия (содержание радия $1,1 \cdot 10^{-8}\%$, тория менее $0,05 \cdot 10^{-4}\%$, калия 1,1%) и тория (содержание тория $8,3 \cdot 10^{-3}\%$, радия менее $1 \cdot 10^{-12}\%$, калия 1,6%). Эталоном калия служила соль с содержанием калия свыше 52%. На основании данных, полученных при методических работах на моделях (рис. 15, в), четко идентифицируются фотопики радия (1,12; 1,38; 1,78 и 2,20 МэВ), тория (1,1; 1,58; 2,13 и 2,62 МэВ) и калия (1,46 МэВ).

По отобранным в районе Куринского взморья образцам определено содержание радия, тория, калия, выполнены минералогические и гранулометрические определения. Результаты этих работ подробно освещены в [69].

Как видно из изложенного, изучение спектрального состава естественного гамма-излучения в устьевых районах, проводимое в комплексе с непрерывной подводной радиометрической съемкой и эхометрией, позволяет получать данные о составе осадков, изучать динамику природных процессов, используя естественные концентрации радиоактивных изотопов.

Гамма-поле морских осадков в зоне развития конседиментационных структур

Накопление современных осадков в областях развития конседиментационных структур носит несколько специфический характер в силу влияния роста структуры на процесс осадкообразования. Поэтому происходят закономерные литофациальные распределения состава осадков по площади и вариации мощности накапливаемых слоев в сводовых и периклинальных зонах и на крыльях тектонически активных структур. Задача состоит в выявлении закономерностей в распределении современных осадков в сводовых частях антиклинальных структур. Последние могут быть выражены и в рельефе дна акватории.

Исследованиями последних лет показано, что в процессе миграции углеводородов от центральной, наиболее погруженной части Южно-Каспийской котловины к периферии происходило постепенное заполнение имевшихся к тому времени структурных и иных форм ловушек, расположенных в обрамлении центральной части Южного Каспия. По-видимому, при разведке более глубоководных зон акватории увеличивается вероятность нахождения более богатых многопластовых газоконденсатных залежей. Это находится в прямой связи с увеличением мощности средне- и верхнеплиоценовых отложений.

Совместное проявление процессов осадкообразования и развития складчатых структур характерно для тех регионов, где сохраняется режим впадины и происходит одновременное воздействие на различные участки региона периодически изменяю-

щихся колебательных движений. Результатом этого может быть также и угловое несогласие.

В. М. Махмудова [37], изучая характер рельефа бассейна осадкообразования низов продуктивной толщи в южной прибрежной полосе Апшеронского полуострова, отмечает, что структурные фундаменты всех известных в настоящее время поднятий в пределах исследуемого региона существовали еще до начала века продуктивной толщи. Аналогичные условия имели место и в северной части Апшеронского ахрипелага. В работе [66] Н. Ю. Халилов пишет, что отложения понтического яруса развиты здесь, как правило, в погружениях и на крыльевых частях антиклиналей. Наибольшую мощность эти отложения имеют в синклиналях. К сводам поднятий слои понта утоняются до полного выклинивания. Последнее является доказательством существования к началу понтического времени поднятий, своды которых в виде небольших островков выступали над поверхностью бассейна. Унаследованность развития и связь с осадконакоплением совершенно справедливо рассматриваются им как два одновременно действующих фактора при тектоническом развитии структуры. Он пишет, что косвенно о конседигенности данных складок можно судить по малозаметному увеличению песчаности разреза подкирмакинской свиты к сводам этих поднятий.

Изменение мощностей и фаций на сводах и периклиналях антиклинальных структур, обусловленное одновременным воздействием процессов осадкообразования и развития структуры, создает благоприятные предпосылки применения гаммаметрии для выявления тектонически активных антиклинальных структур.

Отмеченные выше закономерности присущи подавляющему числу конседиментационных поднятий независимо от типов осадков и определяются, в основном, соотношением скорости осадкообразования и интенсивности испытываемых структурой вертикальных тектонических движений. Последнее обуславливает и контрастность морфологического отображения структуры в рельефе морского дна.

При развитии конседиментационных структур гидродинамическая активность в сводовой зоне будет выше, чем в окрестных периклинальных зонах. Последнее приводит к тому, что при взаимодействии с водными массами из наиболее повышенных участков будут неизбежно вымываться в больших количествах наиболее легко транспортируемые водой частицы — самые мелкие компоненты и частицы с меньшей плотностью. Это приведет к уменьшению мощностей осадков, откладывающихся в сводовых зонах конседиментационных структур, увеличению крупности откладывающегося материала и преобладанию в сводах структур частиц с большей массой. Известно, что своды конседиментационных структур относительно обогащены минералами тяжелых фракций, в то время как в синклинальных зонах на-

капливаются минералы группы слюд и других легко переносимых компонент.

Изучение мощностей современных отложений в условиях растущих структур Южного Каспия, проведенное Е. Г. Маевым [33], показывает, что мощности современных осадков в сводах структур уменьшаются почти наполовину от мощности осадков, накапливающихся в периклинальных зонах. Поскольку эти соотношения будут приблизительно постоянными для определенных участков бассейна или даже для всего бассейна, они могут характеризовать как условия осадкообразования, так и тектонический режим площади. Показано, что в настоящее время максимальные скорости осадконакопления наблюдаются в западной части шельфа Южного Каспия, особенно вблизи устья Куры, где они достигают 6 мм в год. Эта величина слегка уменьшается к северу, в пределах бакинского архипелага (4—5 мм), и гораздо сильнее при увеличении глубин в зоне шельфа (2,5 мм в год). В целом же она на порядок выше в пределах западного шельфа Южного Каспия, чем в его восточной части и в глубоководной мульде. Коллекторские свойства также могут улучшаться к сводам, тогда здесь будут образовываться промышленные нефтегазоносные скопления. Такая картина, как мы видели, могла иметь место в юго-восточной части Апшеронского архипелага в калинское время.

Иное распределение осадков может быть в случае, когда структура испытывает мощное восходящее движение на фоне общего регионального опускания. В этом случае сводовая часть структуры оказывается объектом постоянного разрушения и продукты этого разрушения откладываются в присводовой зоне, причем наиболее крупные фракции будут откладываться в близлежащих к своду зонах. Так могут возникнуть стратиграфически экранированные залежи, что могло иметь место в ачкагельское время в Нижнекуруинской области.

В процессе дальнейшего развития промышленно нефтегазоносной структуры условия сохранения залежи будут диктоваться наличием достаточно «непроницаемой» покрышки и тектоническим режимом. Сохранение восходящих движений в зоне развития структуры, которые не приводят к расформированию, проявится в современном осадкообразовании или других эрозивных процессах, что может контролироваться распределением гамма-поля в породах и осадках поверхностного среза.

Изучение тектонического строения морского дна необходимо для научно обоснованного прогнозирования перспектив его нефтегазоносности. В районе Апшеронского полуострова поиск нефтегазовых месторождений сводится к обнаружению антиклинальных поднятий, причем, как показывает опыт разработки морских месторождений у берегов Азербайджана, все эти структуры обладают многопластовыми высокодебитными горизонтами.

По данным исследований, проведенных под руководством Ф. А. Алексеева [2] в различных районах Союза — в Поволжье, Башкирии, Азербайджане и Западной Туркмении, отмечается значительное совпадение зон пониженных значений естественной радиоактивности пород поверхностного среза с зонами развития структур осадочного чехла. Устанавливается зависимость зон пониженных значений естественной радиоактивности от темпов роста структур и литолого-стратиграфических вариаций образований, обнажающихся на дневной поверхности.

Изучение неотектоники позволяет охарактеризовать исследуемый район градиентом скорости новейших тектонических движений, который может быть определен для движений вертикальных, горизонтальных и наклонных. Изучая цикличность градиента, М. В. Гзовский приходит к выводу, что неравномерность и сложная периодичность тектонических движений во времени является причиной того, что средняя величина градиента уменьшается с увеличением времени усреднения. По этим данным максимальные величины градиента скорости тектонических движений получаются по малым временам осреднения. Наблюдаемое улучшение коллекторских свойств пластов от периферии структуры к своду в некоторых нефтепромысловых районах Азербайджана происходит за счет увеличения алевритовой фракции в сводовых зонах и пелитовой на крыльях. Поскольку в исследуемых районах структуры развиваются унаследованно, неотектонические процессы оказываются теснейшим образом связанными с современным осадкообразованием. Таким путем могут возникать распределения естественной радиоактивности современных морских осадков, отвечающие в общих чертах тектоническому плану погребенных толщ.

Исследование связей литологии осадочных отложений и тектоники позволяет установить ряд общих зависимостей и эмпирических соотношений, являющихся первичной фактической основой. Эта взаимосвязь может реализоваться через рельеф и иметь явный стохастический характер.

Изучение отдельных тектонических структур в связи с их нефтегазоносностью, проведенное А. А. Ференс-Сороцким и др. [64], показывает, что в пределах Тимано-Печорской области устанавливается явная зависимость величины прироста амплитуд за позднеантропогенный тектонический этап от типа флюида, приуроченности к зонам фундамента и коэффициента успешности поиска нефтегазовых месторождений локальных структур (табл. 14).

Становление литолого-тектонических исследований и внедрение математической статистики и вычислительной техники делают возможным ревизию ряда сложившихся представлений по специфике формирования и вариациям пространственной изменчивости осадочных пород, фациальной изменчивости, изменениям коллекторских свойств и т. д.

Связь величины прироста амплитуд со структурами и месторождениями Тимано-Печорской области [64]

Показатели	Прирост амплитуд, %			Всего
	до 5 (малозак- тивные)	от 5 до 20 (средне- активные)	свыше 20 (высоко- активные)	
Всего изучено структур:	19 (100%)	20 (100%)	23 (100%)	62 (100%)
непромышленных («пустые»)	6 (32%)	5 (25%)	6 (26%)	17 (27%)
месторождений нефти и газа	13 (68%)	15 (75%)	17 (74%)	45 (73%)
коэффициент успешности по- иска	0,68	0,75	0,74	0,73
Типы месторождений:				
газовые	3 (23%)	1 (7%)	4 (24%)	8 (18%)
газоконденсатные	3 (23%)	—	1 (6%)	4 (9%)
газо-нефтяные	1 (8%)	4 (26%)	5 (29%)	10 (22%)
нефтяные	6 (46%)	10 (67%)	7 (41%)	23 (51%)
Типы месторождений по пре- обладающему флюиду:				
газовые	7 (54%)	3 (20%)	8 (47%)	18 (40%)
нефтяные	6 (46%)	12 (80%)	9 (53%)	27 (60%)
Распределение структур по зо- нам фундамента и осадочного чехла:				
тектонически стабильные зоны	—	9 (45%)	15 (65%)	24 (39%)
тектонически мобильные зоны	19 (100%)	11 (55%)	8 (35%)	38 (61%)

В работе [23] указано, что вещественный состав и свойства отложений (особенно параметры, характеризующие неоднородность разрезов) более чутко, хотя и более сложно, реагируют на тектоническое положение, чем мощности. Это означает, что все конседиментационные структуры, большие и малые, были выражены геоморфологически. Часто, при практически неизменных мощностях, происходят весьма существенные изменения коллекторских свойств, обусловленные седиментационными и эпигенетическими особенностями отложений. Материалы по Украине показывают, что 75—80% структур, выявленных геолого-геофизическими методами, имеют геоморфологическую выраженность; более 85% деформаций речных долин обусловлены тектоникой, 6% — литологией и 8% вызваны гидрологическими причинами. Строгой компенсации прогибания осадконакоплением почти никогда не происходит. Опыт литолого-тектонических исследований, проведенных в разных регионах, заставляет осторожно

подходить к палеотектоническим построениям, основанным только на анализе мощностей, и различать мощности, синхронные тектоническим движениям и постумные, а также вводить поправку на катагенетическое уплотнение отложений. В результате уплотнения седиментационные различия в мощностях в различных частях структуры обычно сглаживаются, а в некоторых, правда, редких случаях, наоборот, усиливаются.

По данным [23], типы изменчивости морских терригенных отложений могут быть обусловлены переывом на своде (тип I), частичным размывом песчаных отложений и последующим накоплением глинистых осадков на всей площади структуры (тип II) и образованием на своде или крыле аккумулятивного песчаного тела — вала или бара (тип III). В условиях течений нередко песчаные отложения формируются в прогибах. На сводах грубозернистость отложений увеличивается, если течение пересекает конседиментационную антиклиналь. Два типа изменчивости характерны и для аллювиальных отложений. Если поток течет вдоль структур, то песчаные русловые отложения оказываются приуроченными к прогибам; если поток пересекает оси структур, то наиболее песчаные разрезы оказываются приуроченными к поднятиям [23].

Закономерным представляется и вывод, что фациальные типы изменчивости предопределяют распределение на тектонических структурах физических, в частности коллекторских, свойств отложений и особенности нефтегазоносности последних [23].

Изменение интенсивности гамма-излучения в зависимости от глинистости пород описано зависимостью [19]

$$C_{\text{гл}}^{a_{\text{г}}} = \frac{I_{\gamma_x} - I_{\gamma_{\text{гл}}=0}}{I_{\gamma_{\text{гл}}=1} - I_{\gamma_{\text{гл}}=0}}, \quad (24)$$

где I_{γ_x} , $I_{\gamma_{\text{гл}}=0}$, $I_{\gamma_{\text{гл}}=1}$ — интенсивности естественного гамма-излучения в породе с содержанием глины $x\%$, в теоретически чистой неглинистой породе ($C_{\text{гл}}=0$) и в теоретически чистой глине ($C_{\text{гл}}=100\%$); $C_{\text{гл}}$ — содержание глины в долях единицы объема; $a_{\text{г}}$ — численный критерий отложений ($0,3 \leq a_{\text{г}} \leq 0,8$).

В. Н. Дахновым было показано удовлетворительное совпадение результатов лабораторных исследований по изучению зависимости естественной радиоактивности песчано-глинистых осадков палеозоя Башкирии и Подмосковья от их глинистости с расчетными данными, согласно уравнению (24). Содержание глинистости обуславливает также и величину коэффициента эффективной пористости породы. В той же работе показана довольно четкая корреляционная зависимость естественного гамма-излучения от коэффициента пористости.

Изучая зависимость распределения естественной радиоактивности мезозойских и третичных отложений Прикаспийской

впадины от содержания в них глинистой фракции (в % по массе), Л. С. Полак [52] находит, что в песчаных породах, содержащих глинистую фракцию от 10 до 80%, имеет место корреляционная связь по логарифмическому закону с коэффициентом корреляции +0,93. В общем виде этот закон имеет вид

$$\bar{\gamma} = A \lg C_{\text{гл}} + B, \quad (25)$$

где $\bar{\gamma}$ — естественная радиоактивность в усл. ед.; $C_{\text{гл}}$ — содержание глинистой фракции в % по массе; A и B — экспериментально определяемые коэффициенты.

Исследование физических свойств осадочных пород Азербайджана показывает связь гамма-активности с содержанием пелитовой и других фракций (рис. 16). На основании изучения более чем 2000 образцов сделан вывод, что естественная радиоактивность осадочных пород верхов третичных отложений Азербайджана, повышенная естественная радиоактивность древнекаспийских, апшеронских и акчагыльских глин связывается с обеднением их тонкозернистой фракцией (<0,01 мм). Изменение величины естественной радиоактивности в пределах одного стратиграфического комплекса приводит к выводу, что увеличение радиоактивности глин с запада на восток свидетельствует о направлении сноса исходного терригенного материала [34].

Зависимость естественной радиоактивности осадочных горных пород от их глинистости позволяет с помощью гаммаметрии проводить дифференциацию пород по содержанию в них пелитовой фракции. Изучение по интенсивности гамма-поля пространственного распределения содержания пелитовых фракций в породе, а также изменения литолого-фациальных свойств в пределах отдельных стратиграфических подразделений делает возможным получение дополнительных сведений о закономерностях образования исследуемых толщ [2]. Гаммаметрия современных морских осадков показывает закономерности пространственного распределения в них глинистых фракций и освещает условия их образования.

Изучение естественной радиоактивности в области развития унаследованно растущих поднятий позволяет проводить поиски тектонических структур поверхностными радиометрическими методами. Проведенные подводные радиометрические исследования отобразили отчетливую связь естественного гамма-излучения современных морских осадков со структурными поднятиями.

Таким образом, в условиях морского дна и при преобладающем накоплении современных осадков, делающих применение других методов крайне затруднительным, подводная гаммаметрия дает информацию о литологической выраженности консидерационных структур. Последняя определяется гранулометрической сортировкой осадков под воздействием гидродинами-

ческих факторов, что было отмечено Н. М. Страховым [61]. Влияние перечисленных факторов приводит к изменению мощностей и фаций в сводовых зонах унаследованно растущих антиклинальных структур.

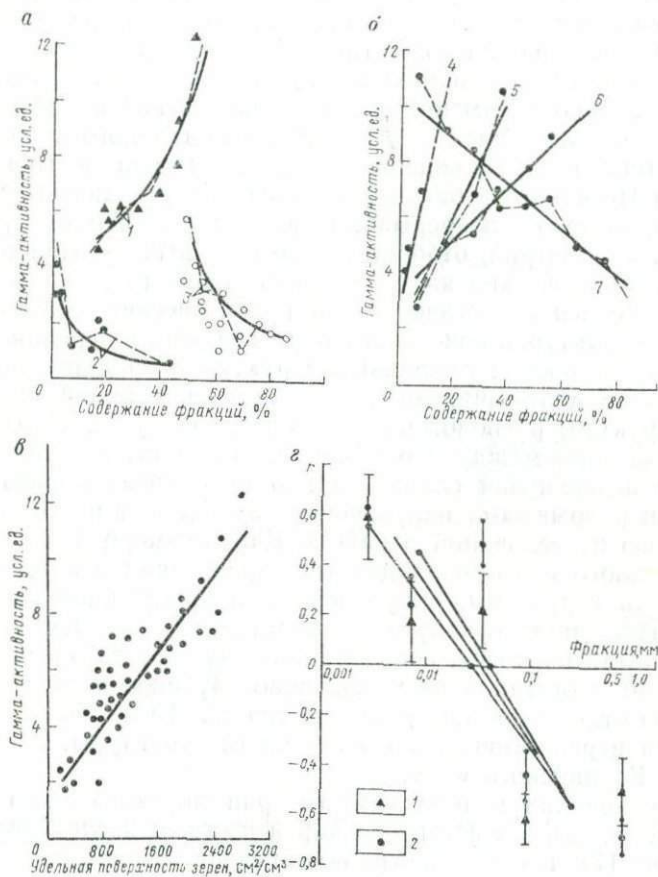


Рис. 16. Влияние состава осадков на величину гамма-активности и коэффициента корреляции (r).

Зависимость гамма-активности от состава донных осадков: a и $б$ — от содержания фракций (1 — $<0,1$ мм, 2 — $>0,25$ мм, 3 — $0,25 \div 0,1$ мм, 4 — $<0,001$ мм, 5 — $<0,01$ мм, 6 — $0,1 \div 0,01$ мм, 7 — $>0,1$ мм), $в$ — от удельной поверхности зерен [35]; $г$ — от размера фракций [69] (1 — о. Песчаный, 2 — Карадаг-море)

Необходимо отметить, что выявление гаммаметрии конседиментационных структур происходит в условиях, когда структура не имеет морфологического отображения в рельефе дна.

Применение гаммаметрии для поисков антиклинальных структур в юго-западной части Каспийского и северо-западной части Азовского морей

Морские радиометрические исследования по изучению распределения интенсивности естественного гамма-излучения донных грунтов в районе развития нефтегазосодержащих структур и перспективных площадей в юго-западной части Каспийского моря были проведены в пределах Апшеронской и Кобыстанской зон нефтегазонакопления. Это районы подводного продолжения Карадагского месторождения, острова Булла и Булла-море, острова Песчаного и банки Макарова. На указанных площадях была проведена непрерывная подводная радиометрическая съемка, батиметрия, отобраны пробы донных грунтов и составлены литологические карты осадков морского дна.

Имеющиеся геологические и геофизические материалы и данные структурно-поискового и разведочного бурения показывают, что строение локальных структур, располагающихся на морских продолжениях антиклинальных зон, аналогично строению структур, расположенных в пределах суши. Наблюдается несоответствие между спокойной складчатостью мелового времени и интенсивной складчатостью неогеновых образований с частыми разрывными нарушениями в сводовых частях складок.

Целью исследований в районе Карадаг-море было изучение естественного гамма-поля донных образований в пределах южной части структуры, приуроченной к прибрежной зоне моря. На близлежащих сухопутных участках Г. А. Ахмедовым в 1936 г. были получены первые данные о нефтегазонасности Карадагской площади и рекомендовано глубокое разведочное бурение на отложения продуктивной толщи. Им же была отмечена большая перспективность южной части структуры, перекрытой водами Каспийского моря.

На основании данных гаммаметрии морского дна в районе Карадаг-море была построена карта изогамм исследуемого района (рис. 17). По всем профилям отмечается повышение уровня интенсивности гамма-излучения донных грунтов при удалении от берега. Так, в исследуемом районе при удалении от берега 10—12 миль отмечены значения интенсивности гамма-излучения на уровне 3—3,5 мкР/ч. Вблизи берега интенсивность снижается до 2 мкР/ч и меньше.

Для изучения природы явления повсеместно, где это оказывалось возможным, был проведен отбор проб донных грунтов поверхностным дночерпателем с емкостью ковша 0,01 м³. На основании изучения отобранных образцов была составлена карта литологического состава донных отложений. Эта карта показывает развитие в исследуемом районе сероцветных илов, сменяющихся в прибрежной полосе известковистыми илами с

ракушей, в которых встречаются незначительные по величине, ориентированные параллельно береговой линии, локальные участки распространения песчанистых илов и илистых песков с примесью ракуши [69].

Изучение содержания калия по 139 образцам показало, что концентрация калия в донных осадках находится в пределах

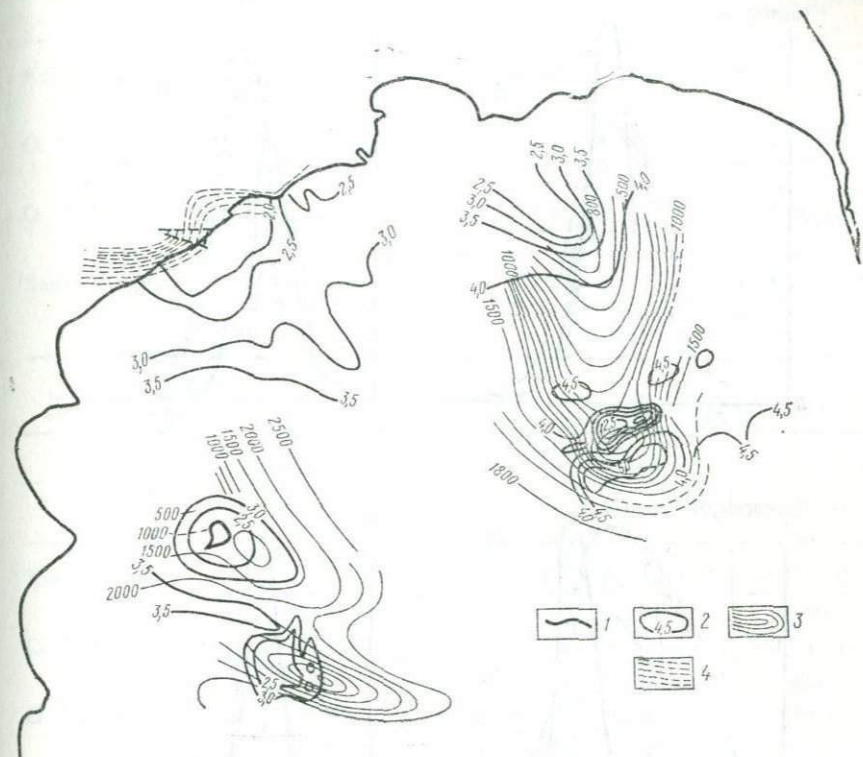


Рис. 17. Схема естественной радиоактивности в юго-западной части Каспийского моря [69]. 1 — береговая линия; 2 — изогаммы; изогипсы в м: 3 — по данным геофизики, 4 — по данным бурения

кларковых значений — 1,94% (рис. 18). Указанное распределение близко к нормальному, поэтому возмущающим влиянием изотопов калия можно пренебречь, тем более что отмеченные на мористом окончании профилей значения гамма-поля 3,5 мкР/ч несколько выше средних фоновых значений донных грунтов юго-западной части Каспийского моря. Распределение содержания тория в отобранных образцах донных осадков проанализировано по 149 пробам. Область распространения фоновых значений концентрации натрия в осадках удовлетворительно совпадает с аналогичными данными по калию, что и следует ожи-

дать в силу однозначности их геохимической миграции. Наличие двух максимумов в кривой распределения содержания бора в районе Карадага обусловлено участием в процессе осадкообразования продуктов грязевулканических проявлений, в которых отмечаются повышенные содержания бора.

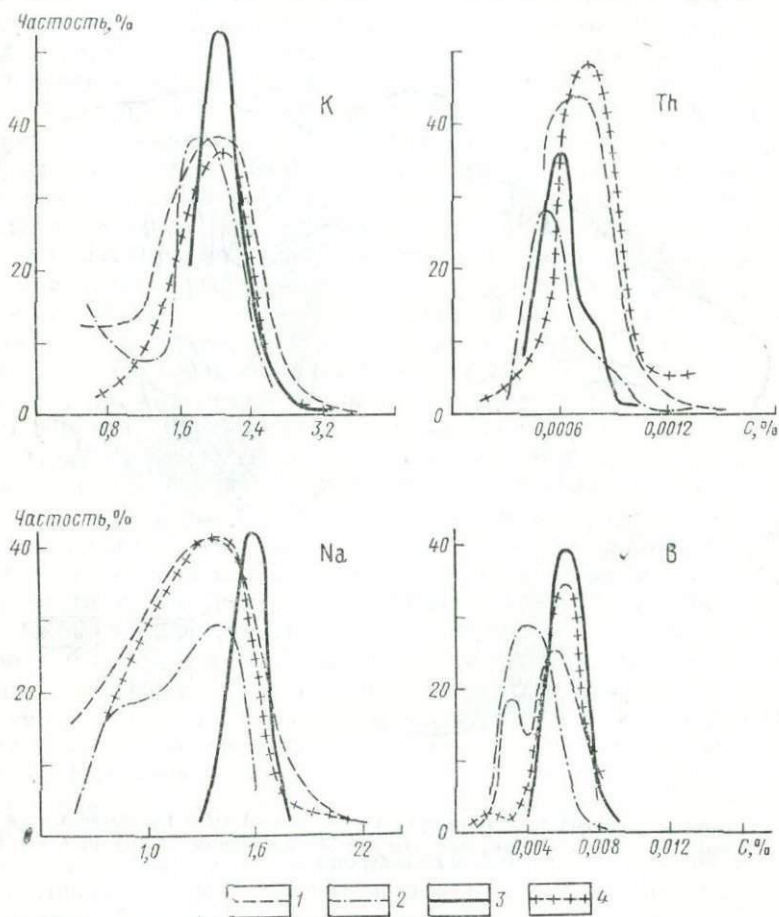


Рис. 18. Сопоставление кривых распределения содержания В, Th, К и Na по структурам Бакинского архипелага [69]:

1 — Карадаг, 2 — Песчаный, 3 — банка Макарова, 4 — о. Булла

Все изложенное хорошо подтверждается при расчете корреляционной зависимости величины естественной радиоактивности донных грунтов от содержания в них калия, натрия, бора и тория. Как видно из табл. 15, наибольшие значения коэффициентов корреляции наблюдаются для фракций менее 0,01 мм

Корреляционная зависимость естественной радиоактивности
донных грунтов
от их гранулометрического состава [69]

Район	Фракция, мм		
	1,0—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01
Карадаг-море	$\frac{-0,68 \pm 0,07}{66}$	$\frac{-0,44 \pm 0,10}{66}$	$\frac{+0,49 \pm 0,09}{66}$
О. Булла	$\frac{-0,24 \pm 0,19}{28}$	$\frac{-0,23 \pm 0,17}{31}$	$\frac{+0,09 \pm 0,18}{31}$
О. Песчаный	$\frac{-0,49 \pm 0,13}{37}$	$\frac{-0,61 \pm 0,10}{37}$	$\frac{+0,22 \pm 0,15}{37}$
Банка Макарова	$\frac{+0,17 \pm 0,12}{76}$	$\frac{+0,12 \pm 0,11}{76}$	$\frac{+0,24 \pm 0,11}{76}$

Продолжение табл. 15

Район	Фракция, мм			
	<0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001
Карадаг-море	$\frac{+0,55 \pm 0,08}{66}$	$\frac{+0,24 \pm 0,11}{66}$	$\frac{+0,63 \pm 0,07}{66}$	$\frac{+0,35 \pm 0,10}{66}$
О. Булла	$\frac{+0,41 \pm 0,15}{31}$	$\frac{+0,33 \pm 0,16}{31}$	$\frac{+0,19 \pm 0,17}{31}$	$\frac{+0,54 \pm 0,13}{31}$
О. Песчаный	$\frac{+0,58 \pm 0,11}{37}$	$\frac{+0,17 \pm 0,16}{37}$	$\frac{+0,59 \pm 0,17}{37}$	$\frac{+0,38 \pm 0,14}{37}$
Банка Макарова	$\frac{-0,03 \pm 0,12}{76}$	$\frac{+0,08 \pm 0,11}{76}$	$\frac{-0,12 \pm 0,11}{76}$	$\frac{+0,22 \pm 0,12}{76}$

Примечание. Здесь и в табл. 16 в числителе указаны коэффициенты корреляции и среднеквадратичные погрешности, в знаменателе — количество определений.

и 0,005—0,001 мм. Несколько меньшее значение имеет коэффициент корреляции для фракции меньше 0,001 мм.

По результатам исследования распределения в грунтах содержания ванадия, никеля, кобальта, хрома, молибдена, марганца и цинка отмечается уменьшение их концентрации в при-сводовой зоне.

Таким образом, распространение в пределах указанного района донных образований различного состава является одним

из определяющих факторов, обуславливающих величину естественной интенсивности гамма-излучения. Другим определяющим фактором является минеральный состав образующегося осадка.

Гамма-поле в районе Карадагского месторождения связано с рельефом дна и происходящим в настоящее время осадкообразованием. Снижение интенсивности естественного гамма-излучения находит объяснение в изменении литологического состава осадка. Этот процесс является следствием развития структуры. Заметное увеличение мощности некоторых горизонтов в направлении от свода к юго-восточному погружению Карадага, как отмечает А. Г. Дурмишьян, по-видимому, является результатом постепенного роста сводовой части складки в процессе седиментации осадков.

Южнее Карадага, на широте мыса Алят, расположен один из крупнейших в Бакинском архипелаге остров Булла, обязанный своим происхождением морскому грязевому вулкану. Здесь развиты отмеченные нами на южном окончании Карадагского участка сероцветные илы, с которыми связываются значения естественной радиоактивности в пределах 3—3,5 мкР/ч. Несколько пониженные значения (2,5 мкР/ч и меньше) отмечаются в наиболее мелководной зоне, окаймляющей остров Буллу, и к востоку от него. Анализ батиметрических данных для восточной части акватории острова показывает, что в рельефе морского дна намечается пологое увалообразное поднятие, ориентированное в юго-восточном направлении от острова.

Через это увалообразное поднятие в восток-юго-восточном направлении прослеживается проходящая через остров Буллу полоса развития илистых песков, ограниченная с севера и юга описанными выше илами. Незначительную дифференциацию литологических разностей и величин естественной радиоактивности донных грунтов исследуемого района можно объяснить развитием грязевулканической брекчии.

Складка Булла-море располагается кулисообразно относительно структуры острова Булла, в 10 милях к юго-востоку от него. С поверхности структура перекрыта четвертичными отложениями. Рельеф морского дна в районе структуры спокойный. При детальном промерах обнаружено, что здесь также глубины моря над сводовой частью структуры на 3—4 м меньше, чем над крыльями. Простирается структура юго-восточное, причем юго-восточная периклиналь в своем окончании приобретает субширотное простираение.

Данные подводной радиометрической съемки показывают, что западной части структуры отвечает зона относительно пониженных (2,5 мкР/ч и ниже) значений интенсивности естественного гамма-излучения донных грунтов (см. рис. 17). Возможно, что сводовая часть структуры разбита на тектонические блоки, интенсивность подвижек которых различна.

Сопоставление данных литологии донных образований и непрерывной подводной радиометрической съемки свидетельствует о приуроченности зон пониженных значений гамма-активности к полям развития осадков крупных фракций. Образование последних генетически связано с гидродинамическим режимом и тектоническими условиями района осадкообразования. Связь унаследованно развивающихся антиклинальных поднятий верхнеплиоценового и неоген-четвертичного времени с полями развития осадков крупных фракций может быть отображением этих структур в осадках морского дна. Радиометрические исследования в районе острова Песчаного выполнялись с 1958 г. Сначала здесь по отобраным ранее образцам донных грунтов в лабораторных условиях исследовалась естественная радиоактивность. Отмечена ее зависимость от гранулометрического состава образцов и степени обогащения их карбонатами. По этим данным были составлены корреляционные таблицы (см. табл. 15). Уже на первых профилях, ориентированных в меридиональном и широтном направлениях южнее острова, отмечались участки пониженных значений естественной гамма-активности, приуроченные к сводовой зоне структуры. Проведенной здесь детальной непрерывной подводной радиометрической съемкой была охвачена площадь около 300 км².

Выполненным ранее геологическим картированием в пределах акватории бухты была установлена область выходов на морское дно отложений апшеронского яруса, обрамляемых современными новокаспийскими отложениями. Эта область в плане проектируется на осевую зону южной периклинали Карачухур-Зыхской антиклинали.

Отмеченный по данным непрерывной подводной радиометрической съемки участок пониженных значений естественной интенсивности гамма-излучения донных грунтов располагается южнее области развития на морском дне апшеронских пород, в пределах осадков современного Каспия, проектируясь на сводовую часть структуры. Участок пониженных значений имеет по изолинии 2,5 мкР/ч ширину 3—4 км и длину 7—7,5 км. Снижение интенсивности составляет величину порядка 1 мкР/ч. К югу интенсивность гамма-излучения плавно увеличивается, достигая значений 4 мкР/ч.

Антиклинальная складка банки Макарова расположена в открытом море, к югу от островов Ханлара и Песчаного, на далеком юго-восточном продолжении Фатьмаи-Зыхской антиклинальной тектонической зоны. Глубины моря в районе банки колеблются от 4 до 8 м, достигая за ее пределами 15—20 м. Здесь отмечается строение морского дна, типичное для кратерного вала крупного подводного грязевого вулкана. На северном краю вала встречаются глубины менее 5 м. Структурно-поисковое бурение показало, что современные морские осадки в районе банки представлены слабосцементированными илами, имеющи-

ми мощность от 10 до 40 м, изредка достигающими 60 м. Вокруг кратерного вала на глубинах более 16—17 м встречены отложения, представленные брекчией грязевого вулкана.

Пониженные значения интенсивности естественного гамма-излучения (2,5 мкР/ч и менее) наблюдаются вблизи сводовой зоны структуры, отмечаемой по данным морской сейсморазведки. Зона пониженных значений оконтуривается также изолиниями 3; 3,5 и 4 мкР/ч. Обращает на себя внимание широтное простиранье сводовой зоны по данным сейсморазведки и контуров зоны развития пониженных значений естественной радиоактивности (см. рис. 17). Переслаивание грязевулканической брекчии с образующимся осадком закономерно для этого района со времени среднего плиоцена. Несомненно, что этими процессами может быть значительно искажена картина, отображаемая в данных естественной радиоактивности пород.

По материалам непрерывной подводной радиометрической съемки по району банки Макарова представляется возможным отделить эффект, вызываемый грязевулканической деятельностью, которому отвечает полоса повышенных значений естественной радиоактивности, от эффекта, создаваемого тектонически активной структурой.

На основании данных корреляционной зависимости величины естественного гамма-излучения донных грунтов от их механического состава (см. табл. 15) видно, что наибольшие величины коэффициентов корреляции наблюдаются для фракции менее 0,01 и 0,005—0,001 мм. Более четко эта зависимость проявляется на участках месторождений острова Песчаного и Карадаг-море, менее четко — в районе структуры острова Булла, приуроченной к потухшему грязевому вулкану. Почти совсем она не проявляется в районе банки Макарова, где грязевулканическая деятельность наблюдается и в настоящее время.

Изучение зависимости интенсивности гамма-излучения донных грунтов по данным непрерывной подводной радиометрической съемки от их механического состава показывает изменение величины коэффициента корреляции от $-0,6$ для более крупных фракций (1,0—0,25 мм) до $+0,6$ для более мелких разностей (0,005—0,001 мм) и подтверждает логнормальную зависимость, установленную ранее В. Н. Дахновым [19], Л. С. Полаком [52] и другими исследователями.

Отмеченные Л. С. Полаком высокие значения коэффициента корреляции ($+0,9$) обусловлены получением информации о естественной радиоактивности каждого образца в пределах единого стратиграфо-литологического подразделения при проведении замеров на лабораторной установке. Поскольку в процессе проведения непрерывной подводной радиометрической съемки интегрируются значения, зафиксированные вдоль профиля исследований, тенденция к снижению численных величин коэффициентов корреляции вполне объяснима и закономерна.

Данные по содержаниям в современных осадках исследуемых районов калия, натрия, бора и тория показывают, что корреляционная зависимость величины естественной радиоактивности донных грунтов от содержания в них указанных элементов (табл. 16) также отражает возмущающее воздействие грязевых вулканов. По данным корреляционного анализа отчетливо видно снижение величины коэффициентов корреляции вблизи очагов грязевулканической деятельности.

Таблица 16

Корреляционная зависимость величины естественной радиоактивности донных грунтов от содержания в них К, Na, Th, В [69]

Район	К	Na	Th	В
Карадаг-море	$\pm 0,52 \pm 0,06$ 137	$\pm 0,44 \pm 0,07$ 137	$\pm 0,10 \pm 0,08$ 138	$\pm 0,39 \pm 0,07$ 131
О. Булла	$\pm 0,38 \pm 0,17$ 28	$\pm 0,24 \pm 0,18$ 28	$\pm 0,16 \pm 0,18$ 28	$\pm 0,15 \pm 0,19$ 28
О. Песчаный	$\pm 0,38 \pm 0,10$ 70	$\pm 0,54 \pm 0,08$ 70	$\pm 0,30 \pm 0,13$ 49	$\pm 0,42 \pm 0,10$ 70
Банка Макарова	$\pm 0,01 \pm 0,13$ 63	$-0,11 \pm 0,13$ 63	$\pm 0,44 \pm 0,10$ 63	$\pm 0,16 \pm 0,12$ 63

Изучение распределений содержаний калия, натрия, бора и тория (см. табл. 16) в донных грунтах показывает, что при сопоставлении их с кривой распределения этих элементов (см. рис. 18) по районам исследований прослеживается зависимость концентрации элементов от условий образования осадков. Для калия, например, характерны экстремальные значения, расположенные в пределах кларковых величин. Менее четко эта зависимость прослеживается по натрию. Наличие двух экстремальных областей значений в распределении бора свидетельствует о том, что в районах развитой грязевулканической деятельности (банка Макарова, о. Булла) наблюдаются повышенные значения концентраций бора по сравнению со среднефоновыми значениями в пределах о. Песчаного. Обогащенные бором осадки переносятся течениями в юго-западном направлении. Это находит свое отражение в двухвершинной кривой распределения бора по району Карадага. Некоторое снижение содержания тория по районам о. Песчаного и банки Макарова по сравнению с районами Карадага и о. Булла объясняется вариациями в минералогическом составе осадков.

Радиометрические исследования в Северном Каспии и у Челекена носили рекогносцировочный характер с целью изуче-

ния общего распределения радиометрических характеристик донных грунтов этих районов. На профилях исследований [69], проложенных по весьма разреженной сети, фиксируются хорошо выраженные участки дифференциации значений естественной радиоактивности. Эта дифференциация позволяет рекомендовать исследуемые районы к детальной гаммаметрии.

Прослеживаемая в Прикуринской зоне нефтегазоносность отложений акчагыльского яруса выдвигает их в число первоочередных объектов поисков. С этими же отложениями связана промышленная нефтегазоносность Западной Туркмении. Значительное увеличение мощности акчагыльских отложений в пределах Южного Каспия нацеливает морские геофизические исследования на поиски структурных форм, которые могут аккумулировать нефть и газ в указанных отложениях.

В пределах зоны шельфа, примыкающей к восточному и западному берегам Южного Каспия, значительное развитие получили острова и банки грязевулканического происхождения. Образование таких островов продолжается и в наши дни. Они отображают в плане зоны антиклинальных поднятий, одинаково хорошо прослеживаемых на суше и на море.

Эти мелководные зоны шельфа и могут быть первоочередными объектами гаммаметрии и морского бурения, доступными как по глубинам перекрывающих их вод, так и по глубинам залегания перспективных нефтегазоносных горизонтов.

Геологическое строение и минеральные ресурсы шельфа Черного и Азовского морей изучены в настоящее время слабее, чем шельфа Каспийского моря. Основное потенциальное богатство шельфа Украины — нефть и газ — связывается с антиклинальными структурами, локализующимися в северо-западной части Черного и в средней части Азовского морей.

Наиболее крупное поднятие — структура Голицына, размерами по верхнему палеогену 59×15 км. Она выявлена в 1963 г. по данным сейсморазведки МОВ. Строение восточной части поднятия детализировалось магнитометрическими и гравиметрическими работами в 1969 г. Западная и восточная части свода структуры ориентированы по-разному. По северному крылу структуры проходит зона ослабления сейсмической записи, связанная, очевидно, с тектоническими нарушениями. Поднятие Голицына приурочено к зоне сочленения докембрийской Восточно-Европейской платформы и эпигерцинского Одесско-Сивашского прогиба. Мощность осадочного чехла в районе поднятия Голицына 7—8 тыс. м. В строении поднятия участвуют три структурных этажа — докембрийский кристаллический фундамент, палеозойский и мел-палеогеновый. На поднятии Голицына заложена первая в Черном море глубокая морская буровая, для которой сооружено специальное основание [17].

Сопоставление данных сейсморазведки и гаммаметрии (по А. А. Емельянову) показывает дифференциацию гамма-по-

ля в районе структуры. Восточная часть структуры отображается в значениях гамма-поля в 2 мкР/ч (до 4). Западная часть неоднородна — северная ее половина характеризуется значениями 1—1,5 мкР/ч; южная — 2—4 мкР/ч. Поскольку радиометри-

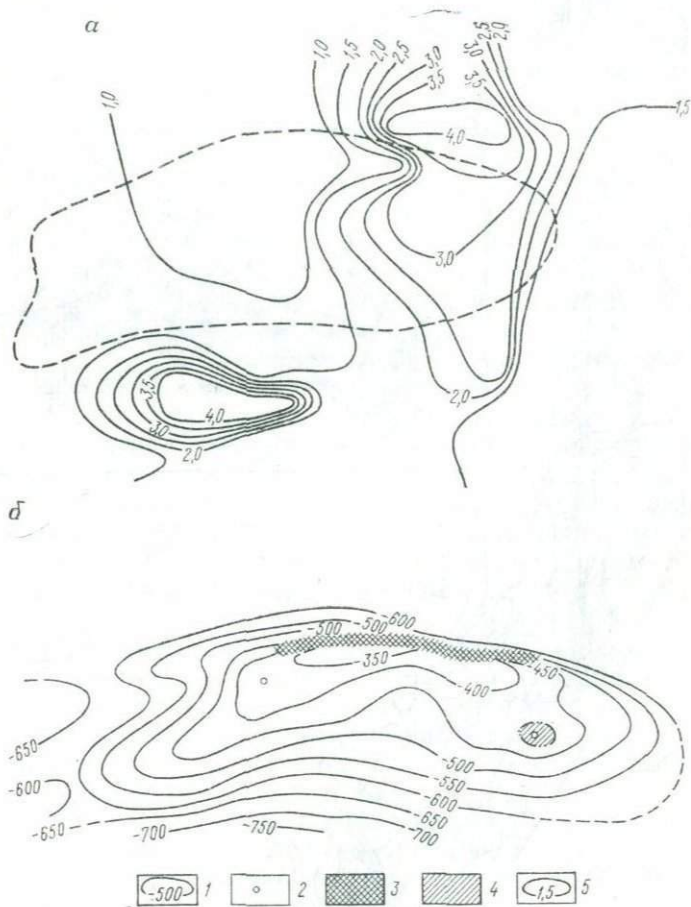
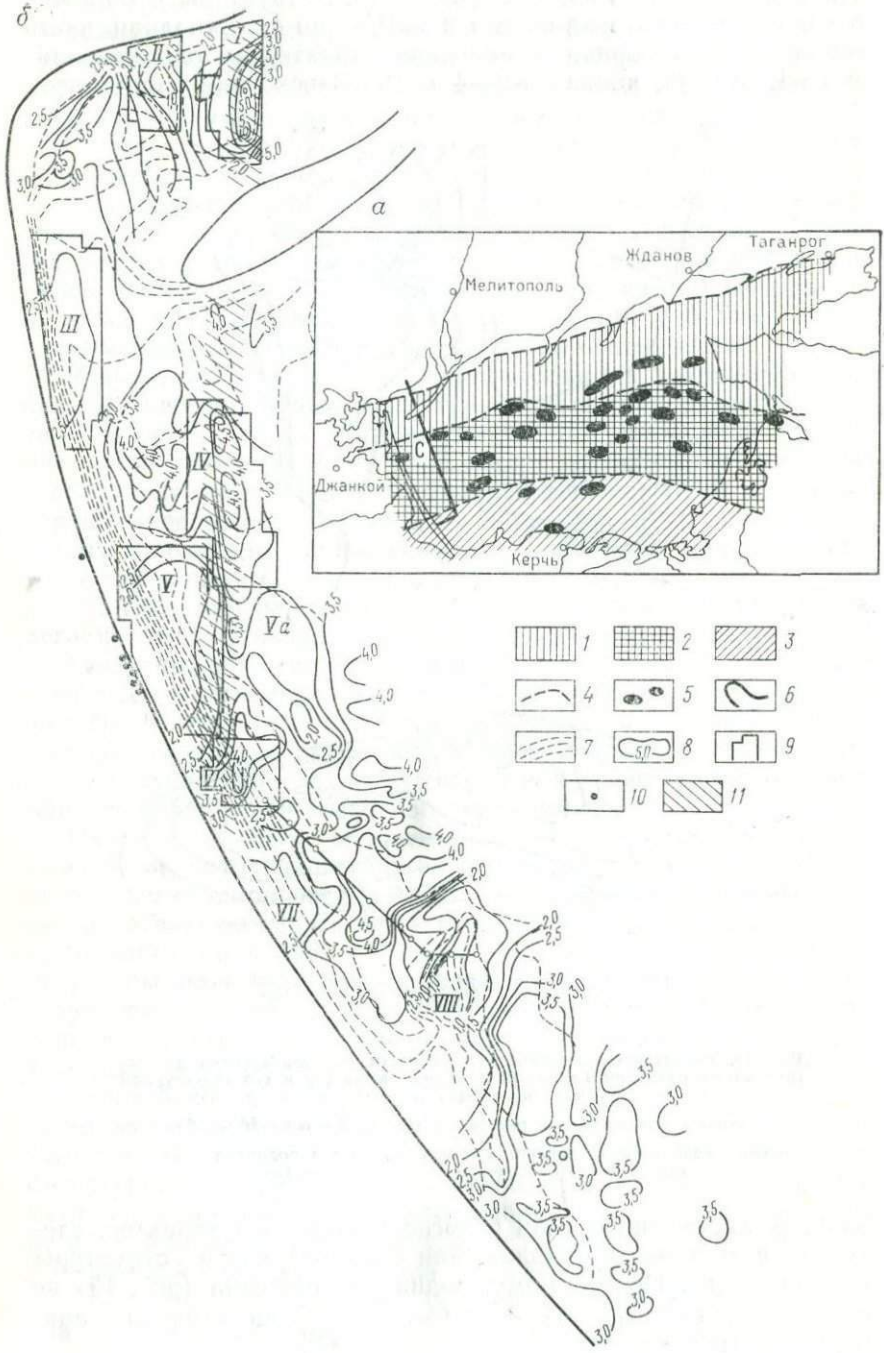


Рис. 19. Сопоставление схемы интенсивности гамма-излучения донных грунтов на поднятии Голицына в Черном море (а) и его структурной карты (б) [17].

1 — изогипсы отражающего горизонта (Pg_3^3); 2 — скважины; 3 — зоны сложной сейсмической записи; 4 — антиклинальное поднятие с амплитудой, меньшей сечения карты; 5 — изогаммы

ческие исследования носили рекогносцировочный характер, сделать по ним выводы о положении сводовой части структуры затруднительно. По-видимому, поднятие Голицына (рис. 19) не является единой структурой, а имеет блоковое строение, аналогичное строению района Булла-море [69].

б



Поисково-разведочные работы на газ были начаты в прибрежной части Азовского моря в 1963 г. Результатом этих работ явилось открытие двух газовых месторождений: на западном побережье Стрелковского и на восточном — Бейсугского. Газоносность этих месторождений связана с майкопскими отложениями. В 1964—1969 гг. в западной части Стрелковского месторождения с суши пробурили 14 разведочных скважин, в пяти из которых были получены газовые фонтаны [21].

Гаммаметрия на Азовском море, проведенная под руководством А. А. Емельянова, началась в 1965 г. на Стрелковском участке и продолжалась в 1966 г. к северу — на Утлюкском и в 1967 г. к югу — на Корабельном участках. Всего было отработано около 1700 км профилей и получено около 100 спектрограмм (на станциях). По этим данным составлена сводная радиометрическая карта (рис. 20). Одновременно проводились батиметрия и отбор проб донных грунтов.

Общий анализ гамма-поля показывает его мозаичный характер. В центральной части района, через западную оконечность полуострова Бирючий, проходит субмеридиональная полоса повышенных значений гамма-поля. Севернее полуострова Бирючий в ее пределах встречаются значения до 8,5 мкР/ч (*I*). К югу она плавно затухает (*IV* и *VI*). Две зоны пониженных значений гамма-поля (*II* и *VIII*) связаны с развитием подводных банок. Три зоны пониженных значений гамма-поля, расположенные непосредственно вблизи Арабатской стрелки (*III*, *V* и *VII*), не связаны с рельефом дна. В целом, гамма-поле к югу носит более спокойный характер, причем модальные значения изменяются от 2,75 мкР/ч на Стрелковском до 3 мкР/ч на Утлюкском и 3,25 мкР/ч на Корабельном участках.

Литологически зоны пониженных значений гамма-поля тяготеют к полям развития песчанистых илов, а зона повышенных значений — к глинистым илам.

Изучение распределения калия в исследуемом районе показывает, что в пределах зон пониженных значений гамма-поля его содержится до 0,6% (*II* участок) и 0,1% (*VIII*). В целом, по шести участкам пониженных значений гамма-поля содержание калия варьирует от 0,1 до 1,7%, составляя в среднем 1,1%.

Рис. 20. Перспективы нефтегазоносности Азовского моря (*a*) [21] и схема естественной радиоактивности донных грунтов его западной части (*b*).

I — зона возможного газонакопления в отложениях палеогена и мела; *2* — зона преимущественного газонакопления в палеогеновых и, возможно, меловых отложениях; *3* — зона преимущественного накопления газа и конденсата в юрских и меловых отложениях, газа и нефти в палеогеновых и, возможно, неогеновых отложениях; *4* — тектонические границы зон газонефтеаккумуляции; *5* — выявленные локальные структуры (*C* — Стрелковская); *6* — береговая линия; *7* — изолинии рельефа дна; *8* — изогаммы; *9* — границы районов проведения подводной гамма-спектрометрии; *10* — скважины; *11* — полоса повышенных значений гамма-активности, отождествляемая с глубинным разломом. *I*, *IV*, *VI* — районы предполагаемого разлома; *II*, *VIII* — районы подводных отмелей; районы, примыкающие к структурам: *III* — Счастливцевской, *V*, *Va* — Стрелковской, *VII* — Усть-Салгирской

Повышенные значения содержания калия в плане отвечают повышенным значениям гамма-поля на Стрелковском участке, изменяясь от 0,9 до 3,1% при средних значениях 1,8%.

Содержание радия изменяется от $59 \cdot 10^{-11}\%$ (в северной части зоны повышенных значений гамма-поля I участка) до $3 \cdot 10^{-11}\%$ в южной части района исследований. В пределах повышенных участков гамма-поля среднее содержание радия $12 \cdot 10^{-11}\%$, в пределах пониженных — $7 \cdot 10^{-11}\%$.

Повышенным значениям гамма-поля отвечает содержание тория от 1 до $9 \cdot 10^{-4}\%$, средняя величина — около $5 \cdot 10^{-4}\%$. В зонах пониженных значений гамма-поля среднее содержание тория возрастает до $9 \cdot 10^{-4}\%$, изменяясь от 2 до $15 \cdot 10^{-4}\%$. На этом фоне наблюдается общая тенденция к повышению содержания тория в прибрежной зоне до $15 \cdot 10^{-4}\%$ с уменьшением в сторону моря до $6 \cdot 10^{-4}\%$.

Содержания и средние значения K, Ra и Th исследуемого района Азовского моря приведены в табл. 17.

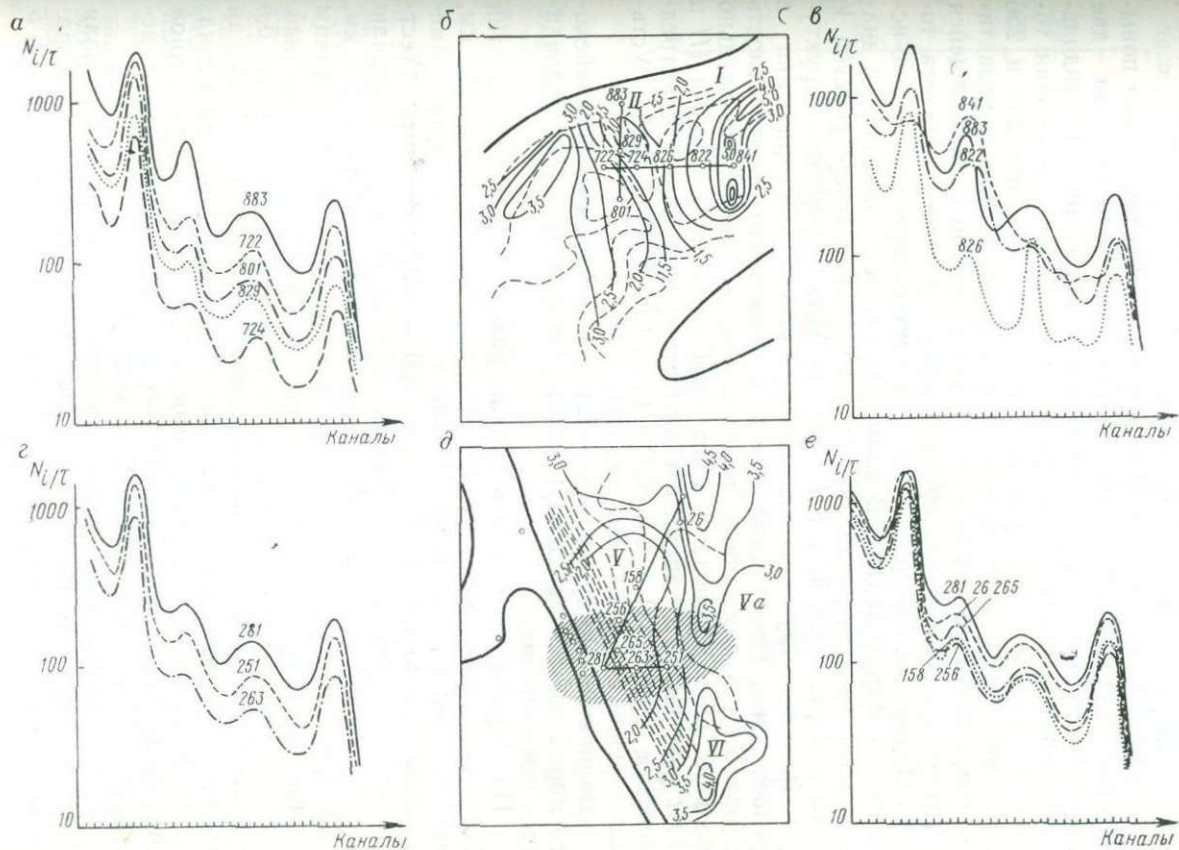
Таблица 17

Отражение содержания основных радиоактивных изотопов в гамма-поле и их связь с литологическим составом осадков

Характеристика гамма-поля и грунтов	Содержание изотопов, %		
	K	Ra · 10 ¹¹	Th · 10 ⁴
Зоны пониженных значений	0,1—1,7	2,0—15,0	2,0—15,0
	1,1	7,0	9,0
Зоны повышенных значений	0,9—3,1	3,0—59,0	1,0—9,0
	1,8	12,0	5,0
По району работ	0,1—3,1	2,0—59,0	1,0—10,0
	1,4	10,0	6,0
Илы песчанистые	0,1—1,8	2,0—18,0	3,0—10,0
	1,2	8,0	7,0
Илы глинистые	0,9—3,1	3,0—59,0	1,0—15,0
	1,7	12,0	8,0

Примечание. Для дроби в числителе указаны пределы значений, в знаменателе — средние значения.

Спектрограммы ряда станций участков I, II и V приведены на рис. 21. Спектрограммы станций 883, 722, 801, 829 и 724 иллюстрируют спектральный состав гамма-излучения в районе II участка; спектрограммы 841, 883, 822 и 826 — в районе I участка. Станция 841 расположена в пределах зоны повышенных значений субмеридиональной ориентации, секущей весь район



работ. На этой спектрограмме видно существенное увеличение вклада радия ($1,76 \text{ МэВ}$).

В пределах растущей отдели (*II* участок) отработаны спектрометрические измерения на ближайших к ней станциях 724 и 829, 801 и 722 — в ее ближайших окрестностях и на станции 883, где отмечается увеличение вклада тория ($2,62 \text{ МэВ}$). Последнее может быть обусловлено влиянием вдольберегового потока торийсодержащих минералов, транзитом растекающихся вдоль северо-западного побережья.

На рис. 20, *г—е* видно, что субмеридиональная полоса повышенных значений сечет зону пониженных значений на две части (*V* и *Va* участки). Локальная гидродинамика (вдольбереговой транзит?) обуславливает увеличение содержания тория на станции 281 и уменьшение его к станциям 263 и 256. Исследование увеличения содержания тория в связи с развитием современных осадков в зоне унаследованно развивающейся структуры и наложения эффекта вдольберегового транзита торийсодержащих минералов представляет интересную научно-исследовательскую задачу. В плане *III* участок пониженного значения гамма-поля располагается у Счастливецской, участки *V* и *Va* у Стрелковской, а *VII* — вблизи Усть-Салгирской структуры. Все эти структуры не имеют видимого отображения в рельефе дна. Необходимо отметить также, что контрастность проработки в гамма-поле развивающихся банок значительно больше. Здесь наблюдаются значения гамма-поля 1 мкР/ч (*II* и *VIII* участки), в то время как на структурах — 2 мкР/ч (Стрелковская структура) и $2,5 \text{ мкР/ч}$ близ Счастливецской и Усть-Салгирской структур (см. рис. 20).

Вариационные кривые (рис. 22) для Азовского и Каспийского морей позволяют сделать некоторые выводы об исследованных гамма-полях.

На Черном море, вдоль границ района работ на поднятии Голицына было проведено два профиля. Один, длиной 158 км , был пройден по восточной границе, от Железного порта субмеридионально до глубин примерно 100 м . Интенсивность естественного гамма-излучения донных грунтов по этому профилю колеблется от $0,5$ до 2 мкР/ч . Второй профиль, длиной 168 км , был ориентирован с востока на запад вдоль южной границы планшета от Тарханкутского п-ова в направлении о. Змеиный. Здесь также отмечаются вариации значений гамма-поля от $0,5$ до 2 мкР/ч с преобладанием величин около 1 мкР/ч . Большая длина этих профилей привела к доминированию значений порядка $0,8 \text{ мкР/ч}$, что нашло свое отображение на вариационной кривой. В двух зонах повышенных значений преобладают величины $2,75 \text{ мкР/ч}$ (см. рис. 22, *а*, кривая 1).

Сопоставление вариационных кривых значений гамма-поля Стрелковского (см. рис. 22, *а*, кривая 2), Утлюкского 3 и Корабельного 4 районов показывает их вклад в суммарную кривую 5

исследуемого участка Азовского моря. Модальные значения интенсивности гамма-излучения для этих зон находятся в пределах 2,75—3,25 мкР/ч. Примерно в этих же пределах лежат модальные значения и для участков Каспийского моря — Причелекенского 1 и Приапшеронского районов (см. рис. 22, б, кривые 2—б). Увеличение модальных значений в ряду о. Булла —

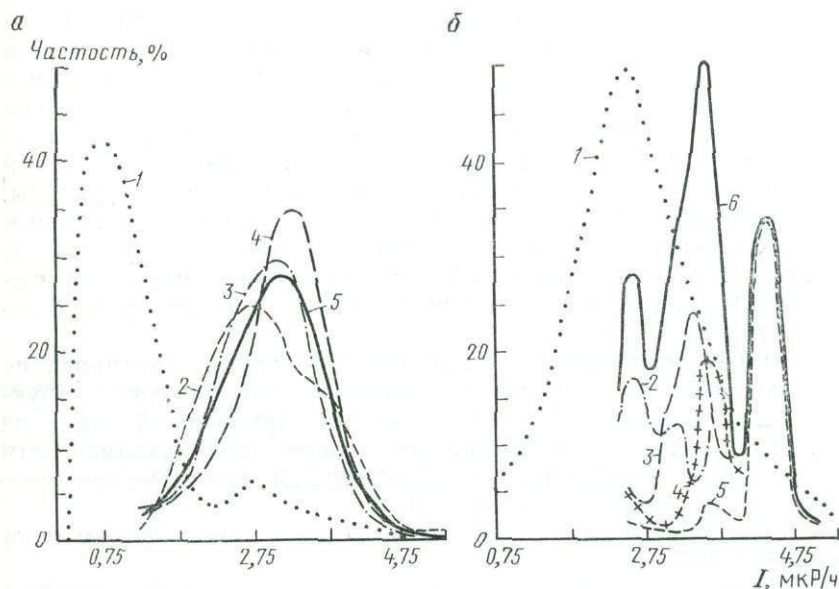


Рис. 22. Вариационные кривые естественной радиоактивности донных грунтов.

а — для Азовского и Черного морей: 1 — поднятие Голицына и два рекогносцировочных профиля, 2 — Стрелковский район, 3 — Углюкский район, 4 — Корабельный район, 5 — суммарная (по 2—4); б — для Каспийского моря: 1 — Причелекенский район, 2 — Карадаг, 3 — о. Булла, 4 — о. Песчаный, 5 — банка Макарова, 6 — суммарная (по 2—5) по Приапшеронскому району

о. Песчаный — банка Макарова может быть объяснено преобладанием продуктов грязевулканической брекчии в осадках исследуемых районов.

Сопоставление вариационных кривых распределения значений естественного гамма-излучения Причелекенского района Каспийского моря и Стрелковского района Азовского моря показывает, что в пределах исследованных участков акваторий величины модальных значений естественной интенсивности донных образований адекватны и характеризуются величинами 2,5 мкР/ч. С увеличением площади исследований модальные значения несколько изменяются. Таким образом, изменения модальных значений позволяют получать первичные данные об осадкообразовании в исследуемом районе.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что участкам шельфа, приуроченным к сводовым частям антиклинальных тектонических структур, отвечают закономерные изменения в составе и величине естественной радиоактивности донных грунтов. Последнее вызвано тектоническим режимом развития структуры и дает возможность инструментального изучения современного осадкообразования.

Таким образом, наблюдаемая в процессе современного осадкообразования сортировка отложений по минералогическому и гранулометрическому составу находит свое отражение в гамма-поле донных образований. Получаемая информация о величине естественной радиоактивности донных грунтов может интерпретироваться как результат наложения процесса современного осадкообразования на тектоническое развитие структуры.

В настоящее время в мировой практике складывается многоэтапный подход к разведке нефтяных и газовых месторождений. В силу специфики морских работ значительная роль на всех этапах принадлежит рациональному комплексу геолого-геофизических методов.

I этап — рекогносцировочные работы. Здесь картирование физических полей нацелено на выделение тектонических структур I и II порядков, особенно в сугубо прибрежной зоне; на выявление и трассирование предполагаемых зон разломов. Эти работы могут выполняться с привлечением гаммаметрии (интегральной и спектрометрической).

II этап — региональные работы. Применение гаммаметрии малоперспективно.

III этап — детальные исследования. В проведении морских геофизических исследований этого этапа гаммаметрия должна участвовать при составлении детальных (М. 1 : 200 000, 1 : 50 000, 1 : 10 000) карт естественной радиоактивности и содержаний основных гамма-излучателей в морских грунтах исследуемых зон.

IV этап — структурно-поисковые буровые работы. На этом этапе гаммаметрия участвует наряду с остальными стандартными методами исследования скважин.

Применение гаммаметрии в комплексе геолого-геофизических методов на море основано на ее возможностях: а) фиксировать все выявленные другими методами тектонические антиклинальные структуры; б) наряду с выделением структур проводить выявление и трассирование зон предполагаемых разрывных нарушений по повышенным значениям гамма-поля; в) проводить изучение распространения продуктов грязевулканической деятельности на морском дне; г) вести прямое геологическое картирование в случае выхода коренных пород на морское дно; д) исследовать литодинамику приустьевых пятен тонкозернистых осадков на взморье.

Поиски современных прибрежно-морских россыпей методом гаммаметрии

Среди минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана видное место принадлежит россыпным месторождениям цветных, черных и благородных металлов. Расположенные на поверхности дна моря, в пределах незначительных (до 50—75 м) глубин, неподалеку от современной береговой линии, они могут стать объектом первоочередной разведки и эксплуатации.

Из полезных компонент современных прибрежно-морских россыпей промышленный интерес представляют, в основном, минералы тяжелой фракции — касситерит (олово), ильменит, рутил, лейкоксен (титан), циркон (цирконий), магнетит (железо), монацит (редкие земли), хромит, золото, алмазы и т. д. Сейчас только начинается изучение твердых полезных ископаемых морского дна. Объем их добычи еще невелик. В настоящее время добыча из подводных россыпей не превышает 7% добычи из россыпных месторождений суши. Ведущиеся в настоящее время основные промышленные прибрежные разработки сосредоточены на малых глубинах и направлены на добычу касситерита (юго-восточная Азия) и железосодержащих песков (близ побережья Японии). Объем добычи твердого минерального сырья сдерживается развитием техники морской добычи. Используются, как правило, технические средства и способы, применяемые на суше. В начале 70-х годов на первом месте в мире по разработке современных прибрежно-морских титан-циркониевых россыпей находилась Австралия, монацитовых песков — Бразилия; добыча касситерита проводилась у побережий Таиланда, Индонезии, Малайзии; алмазов — на шельфе юго-западной Африки; золота — у побережья Калифорнии и на пляжах штата Орегон в США.

В настоящее время доля стоимости минерального сырья, добываемого на морях и океанах, составляет около 3% общей его стоимости. Таблица 18 показывает, что уже начата эксплуатация месторождений на глубинах свыше 200 м.

Ныне в 14 странах функционирует около 100 подводных рудников, где добывают уголь, железные руды, олово, никель, медь, золото, известняк. Интенсивно проводятся поиски залежей поташа, баритов. Одна из крупных россыпей минералов тяжелой фракции обнаружена на восточном побережье Австралии близ 30-метровой изобаты, в 2,5 км от берега.

Подводные разработки и исследование процессов добычи
минерального сырья [96]

Сырье	Вид работ	Глубина, м	Район работ
Арагонит	Драгирование	45	Багамские о-ва
Алмазы	То же	180	Юго-Западная Африка
Золото	Добыча	180	Филиппины, Аляска
Тяжелые металлы	»	180	Австралия
То же	»	180	Новая Зеландия
»	»	180	Тасмания
Железо	»	180	Филиппины
Железистые пески	Драгирование	9	Япония
То же	Добыча	180	Папуа, Новая Гвинея
Марганец	»	180 ÷ 780	Плато Блейка
Марганцевые конкреции	»	3600	Канада
То же	»	3600	Тихий океан
Фосфориты	»	—	Южно-Африканская Респуб- лика
То же	»	180 ÷ 780	Плато Блейка
»	»	—	Индия
»	Добыча попутная	180	Калифорния
»	Добыча	180	Австралия
Фосфатные пески	»	180	Мексика, Северная Каролина
Песок	Драгирование	90	Новая Англия
Пески известковистые	»	45	Исландия
Раковины	»	9	Калифорния
Сульфидные глины	»	1800	Красное море
Сера	Метод Фраша	18	Луизиана
Одоло	Добыча	180	Борнео
То же	Драгирование	45	Индонезия
»	Добыча	180	Малайзия
»	Драгирование	45	Таиланд
»	Добыча	180	Великобритания
»	»	180	Соломоновы острова
Титан	»	180	Филиппины

При исследованиях западногерманским судном «Валдивия» у юго-восточного побережья Африки на глубинах около 50 м, на расстоянии около 50 км от берега выявлена зона длиной более 100 км и шириной порядка 10 км, в пределах которой валовое содержание минералов тяжелой фракции достигает 5—20%.

При исследованиях в Красном море это же судно обнаружило области развития илов, содержащих до 5% цинка и 1% меди. Общие запасы по каждому металлу оцениваются по 1 млн. т. Эти данные вероятно, могут позволить с новых позиций пересмотреть известную информацию о ранних стадиях оруденения. Таким образом, знание геологии моря позволит получить ценную дополнительную информацию по геологии близлежащих сухопутных регионов.

Оценки экономических аспектов разработки подводных месторождений, как правило, оптимистичные. Многолетняя практика добычи рутилового и цирконового концентратов в Австралии позволяет при благоприятных условиях рентабельно разрабатывать морские россыпи с содержанием минералов тяжелой фракции 1 и даже 0,5%.

Касситеритовые россыпи могут рентабельно разрабатываться при содержаниях олова, не превосходящих 0,15%.

Из акцессорных минералов в россыпях встречаются ильменит, рутил, циркон, монацит (Балтийское море), титаномагнетит (Черное море, Японское, Восточно-Сибирское), касситерит. Основанные на дифференциации в распределении естественных радиоактивных элементов радиометрические методы (интегральные и спектрометрические) указывают на ряд существенных геолого-геохимических признаков, которые могут быть использованы как при поисковых работах, так и при эксплуатационной разведке россыпей и исследовании их естественной регенерации.

Изучение естественной радиоактивности современных осадков шельфа имеет большое научное значение. Новые перспективы открываются в связи с возможностью использовать полупроводниковые детекторы для исследования непрерывного спектра гамма-излучения до 3 МэВ.

Во Франции выполнены работы по изучению гидродинамической активности осадков в эстуариях, естественной радиоактивности на пляжах и по использованию источников наведенной активности для изучения динамики речных кос.

Таблица 18 иллюстрирует развитие подводных горных разработок твердого минерального сырья.

Цель наших исследований — изучение особенностей распределения естественных радиоактивных элементов на известных россыпях, приуроченных к районам с различными геолого-геоморфологическими особенностями строения, и оптимизация на этой основе проводимых на шельфах работ по данным предварительных ядерно-геофизических изысканий. Исследуемая нами дифференциация естественного гамма-поля современных осадков связана с увеличением числа импульсов в фотопиках с максимумами энергий 1,58; 1,78; 2,2 и 2,62 МэВ, что хорошо коррелируется с увеличением валового содержания минералов тяжелой фракции.

Проведенные работы могут являться основой для разработки методики поисков современных россыпных месторождений прибрежно-морского генезиса, содержащих титан, цирконий, гафний, олово, редкие земли.

К сожалению, еще и сегодня не утратило актуальности высказывание Ю. А. Билибина о том, что малое развитие у нас прибрежных россыпей морских и озерных объясняется отчасти тем, что подавляющее большинство наших золотоносных районов расположено в удалении от морских берегов; в тех же из них, которые расположены вблизи моря, кажущееся отсутствие прибрежных россыпей является лишь следствием их недостаточной изученности.

Гамма-спектрометрия титан-циркониевых россыпей юго-восточной части Балтийского моря

Минералогическая дифференциация и накопление тяжелых минералов в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря, как показали многочисленные исследования, обусловлены существованием Восточно-Балтийского потока песчаных наносов. Этот поток наносов, огибая Самбийский полуостров, проходит вдоль его северного побережья, обтекает контур Куршской косы и направляется далее на север, заканчиваясь крупной надводной и подводной аккумулятивной формой у мыса Колкасагс. Основное питание Восточно-Балтийский поток получает за счет размыва ледниковых флювиогляциальных отложений и олигоценовых песков района Самбийского полуострова, откуда выносятся от 100 до 200 тыс. м³ песка в год. Недонасыщенность потока мелким песчаным материалом компенсируется размывом прикорневой части Куршской косы, испытывающей в связи с этим медленное отступление. Однако из-за изменения экспозиции берега по отношению к господствующему западному волнению поток наносов подходит к дистальной части Куршской косы (район Смилтине — Клайпеда) уже насыщенным. К северу от Клайпеды берег принимает меридиональное направление и вплоть до Лиепай характеризуется слабой аккумуляцией песчаного материала. Аккумулятивные формы в этом районе приурочены к локальным участкам. Порт Лиепая почти полностью перехватывает песчано-алевритовые наносы, поступающие с юга. Весь этот материал оседает в акватории порта, вызывая его заносимость. Поэтому к северу от порта по существу начинается новый поток, получающий питание за счет абразии берегов. У мыса Овиши берег снова резко меняет направление и отклоняется к востоку. В связи с этим часть песчаного материала аккумулируется на выступе мыса Овиши, часть выпадает на его подводном продолжении, а часть претерпевает вдольбереговое перемещение в Ирбенский пролив и почти полностью откладывается при входе в Рижский залив.

Изучение данных по заносимости портов восточной Балтики показало, что Восточно-Балтийским потоком перемещаются значительные по объему массы песчаного материала. Мощность потока наносов у порта Клайпеда может достигать 300—500 тыс. м³ в год. При объеме наносов, поступающих за счет абразии берегов Самбийского полуострова (100—200 тыс. м³ в год), недонасыщение потока в 200—300 тыс. м³ в год должно компенсироваться размывом дна и берега прикорневой части Куршской косы. На участке к северу от Клайпеды мощность потока достигает 350—450 тыс. м³ в год. При этом около 250 тыс. м³ песчано-алевритового материала проходит весь участок до Лиепай транзитом, а примерно 100—150 тыс. м³ аккумулируется в районе от мыса Миетрагс до порта Лиепай на отрезке берега 30 км.

Объемы песчаного материала, перемещаемого вдоль берега и образующего Восточно-Балтийский поток, значительны и вполне достаточны для активного пополнения прибрежной зоны рыхлым обломочным материалом. Однако изменение емкости потока определяет, в свою очередь, минералогическую дифференциацию наносов и неравномерное накопление тяжелых минералов по ходу потока.

Анализ материалов по морфологии и динамике берегов, распределению состава наносов на дне и на берегу позволил выделить по ходу Восточно-Балтийского потока ареалы концентрации тяжелых минералов, включающих основные полезные компоненты (ильменит, рутил, циркон и лейкоксен).

Первый регион с очагами концентрации тяжелых минералов отмечается в северной половине Куршской косы. Полоса накопления тяжелых минералов начинается за внешней зоной валов. В связи со значительным развитием у Куршской косы вдольбереговых штормовых течений мощность слоя, обогащенного минералами, невелика. Имеются участки, где продуктивный слой перекрыт песками, не содержащими тяжелой фракции. По этому региону могут быть выделены два очага концентрации минералов: один — с меньшим валовым содержанием тяжелых минералов — против среднего участка косы; другой — с большим содержанием минералов — против дистального участка косы, в районе Смилтине.

Второй регион с повышенным содержанием минералов расположен между мысами Миетрагс и Лиепай. Он приурочен к области слабой аккумуляции алевритового материала. В связи с длительностью процесса аккумуляции тонких наносов на этом участке берега и замедлением скорости вдольберегового перемещения наносов слой, обогащенный тяжелыми минералами, имеет здесь большую мощность, достигая 1,5—2 м. При этом наибольшее содержание тяжелых минералов отмечено на глубине 0,25—0,65 м от поверхности дна.

Минералогические анализы дночерпательных проб показали,

что в приповерхностном слое осадков мощностью до 20 см содержание полезных минералов колеблется в следующих пределах: ильменита — от 7 до 128 кг/м³, лейкоксена — от 0,1 до 6,8 кг/м³, рутила — от 0,5 до 12,5 кг/м³.

Приуроченность тяжелых минералов к 0,5—1,5-метровому слою наносов и особенно высокое содержание тяжелых минералов на отдельных участках в поверхностном слое свидетельствует о том, что концентрация тяжелых минералов связана с современными процессами вдольберегового перемещения песчаных наносов и, следовательно, установленные очаги концентрации тяжелых минералов представляют собой современные россыпи, непрерывно пополняемые рыхлым обломочным материалом. Это дает основание считать, что выявленные у восточного побережья Балтики современные россыпи тяжелых минералов при добыче песков будут восстанавливаться естественным путем. В связи с этим большую актуальность приобретает изучение процессов естественной регенерации современных прибрежно-морских россыпей и зависимость этой регенерации от определенных гидро- и литодинамических условий, а также изучение регенерации россыпей при добыче песков. Изучение естественной регенерации россыпей позволит определить наиболее оптимальные режимы эксплуатации современных прибрежно-морских месторождений.

На основании ранее проведенных Институтом океанологии АН СССР, ВНИИМОРГЕО, МГИ геолого-геоморфологических работ были намечены районы для радиометрических исследований. Первый — вблизи границы с ПНР в районе Шукинского маяка предусматривал отработку одиночного профиля с отбором проб дночерпателем. Второй — у дистальной части Куршской косы (Нида — Смилтине) должен был быть полигоном для проведения серии профилей с последующим их повторением для исследования динамики россыпи. Третий — в районе пос. Юрмалциемс был нацелен на детальное изучение россыпи зоны мыса Миетрагс-Лиепая. И, наконец, четвертый располагался в районе мыса Овиши, где, по предварительным данным, можно было ожидать раздвоение потока наносов. Геологическая документация этих районов проводилась по данным МГИ и ВНИИМОРГЕО.

Кратко остановимся на вещественном составе и выходе полезных минералов современных образований прибрежного мелководья. Как показали результаты анализа образцов, отобранных в районе Юрмалциемс в 1968 г. и исследованных в Институте геологии (г. Вильнюс), основная масса песчаных отложений (94,7%) приурочена к интервалу 0,4—0,063 мм. Коэффициент сортировки — 0,001 — 0,293, в среднем — 0,12.

Выход полезных минералов тяжелой фракции (навеска 20—30 г из фракции 0,4—0,063 мм) составляет в среднем 4,9 кг/м³ (ильменит — 3,05, рутил — 0,86, циркон — 0,79, лейкоксен —

0,20 кг/м³). Наряду с цирконом в число аксессуарных минералов входит и другой естественный гамма-излучатель — монацит. Благодаря присутствию этих минералов становится возможным определение местоположения россыпей по их естественному гамма-излучению с энергией до 3 МэВ.

Сопоставление данных 95 минералогических определений, выполненных в 1968 г. во ВНИИМОРГЕО, позволило провести корреляцию содержаний минералов тяжелой фракции, ильменита, рутила, монацита, циркона (табл. 19), что явилось основным

Таблица 19

Коэффициенты корреляции r данных минералогических анализов (95 определений) по району Куршской косы

X	Y	$r \pm \sigma$	T
Монацит	Циркон	0,2193 ± 0,0976	2,1685
	Тяжелая фракция	0,3067 ± 0,0929	3,1076
	Ильменит	0,3065 ± 0,0929	3,1055
	Рутил	0,3277 ± 0,0915	3,3450
Циркон	Рутил	0,8398 ± 0,0305	14,7591
	Ильменит	0,9200 ± 0,0159	22,3934
	Тяжелая фракция	0,9311 ± 0,0137	24,3510
Ильменит	Тяжелая фракция	0,9614 ± 0,0077	33,7033
	Рутил	0,9200 ± 0,0159	22,3934
Рутил	Тяжелая фракция	0,8984 ± 0,0197	19,7281

Примечание. Здесь и в табл. 20 и 22 X и Y—численные значения коррелируемых параметров (содержания минералов, элементов, площадей фотопиков соответственно).

положением проведения гаммаметрии современных прибрежно-морских титан-цирконовых россыпей юго-восточной части Балтийского моря. В пользу этого положения говорил также опыт работ по району Куршской косы, полученный при работах с МГИ в 1967 г.

В результате исследования связи полезных и радиоактивных минералов показано, что коэффициент корреляции суммы минералов тяжелой фракции β и интенсивность естественного гамма-излучения имеет величину $0,7907 \pm 0,0424$ ($T = 11,2622$). Базируясь на известной зависимости связи содержания ильменита и минералов тяжелой фракции, провели спектрометрию в области 2,45—2,9 МэВ для изучения изменения величины фотопика тория (2,62 МэВ) от валового содержания минералов тяжелой фракции (рис. 23).

По этим данным определяется величина уровня дискриминации для максимального сближения масштаба записи интенсивности естественного гамма-излучения и валового содержания минералов тяжелой фракции (см. рис. 23). В районе северной

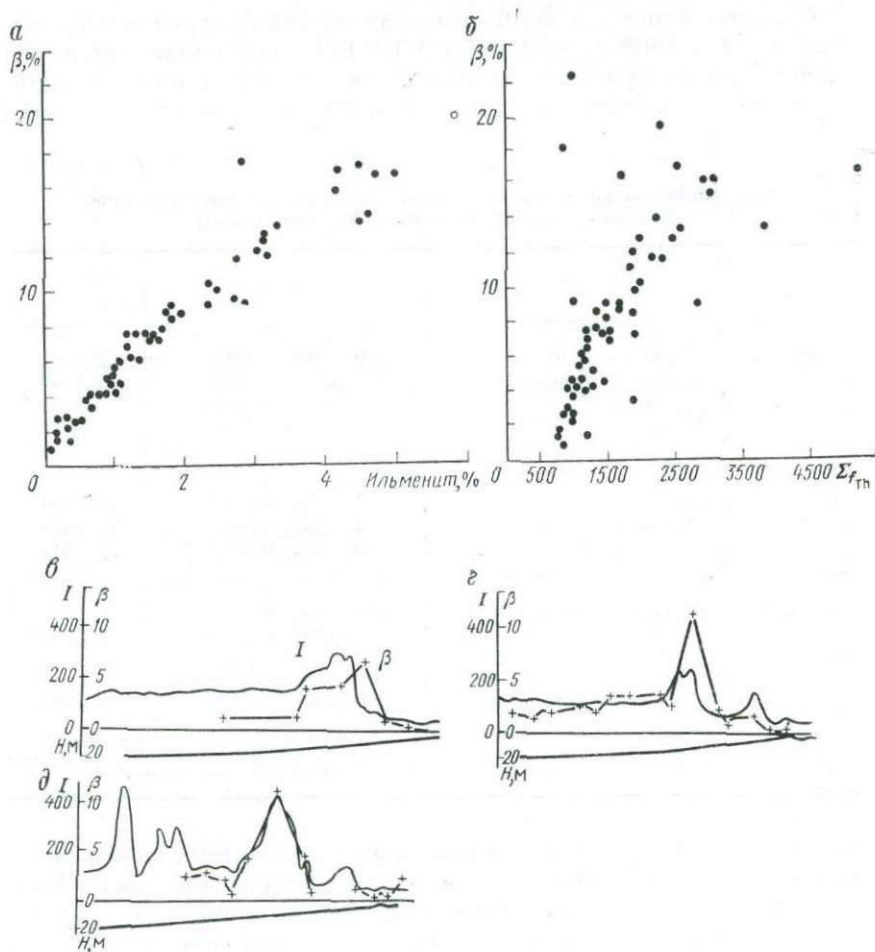


Рис. 23. Зависимость содержания ильменита (а), числа импульсов в фотопике тория ΣJ_{Th} (2,45—2,90 МэВ) (б) и интенсивности естественного гамма-излучения I (в отн. ед.) на профилях (в—г) от валового содержания минералов тяжелой фракции β в образцах россыли у Куршской косы (юго-восточная часть Балтийского моря)

части Куршской косы гаммаметрией отображаются три полосы осадков, обогащенных минералами тяжелой фракции (рис. 24). Ближняя к берегу, расположенная за зоной прибрежных валов, тяготеет к глубинам 5—8 м. Она была ранее отмечена и при геолого-геоморфологических исследованиях. Все отмеченные

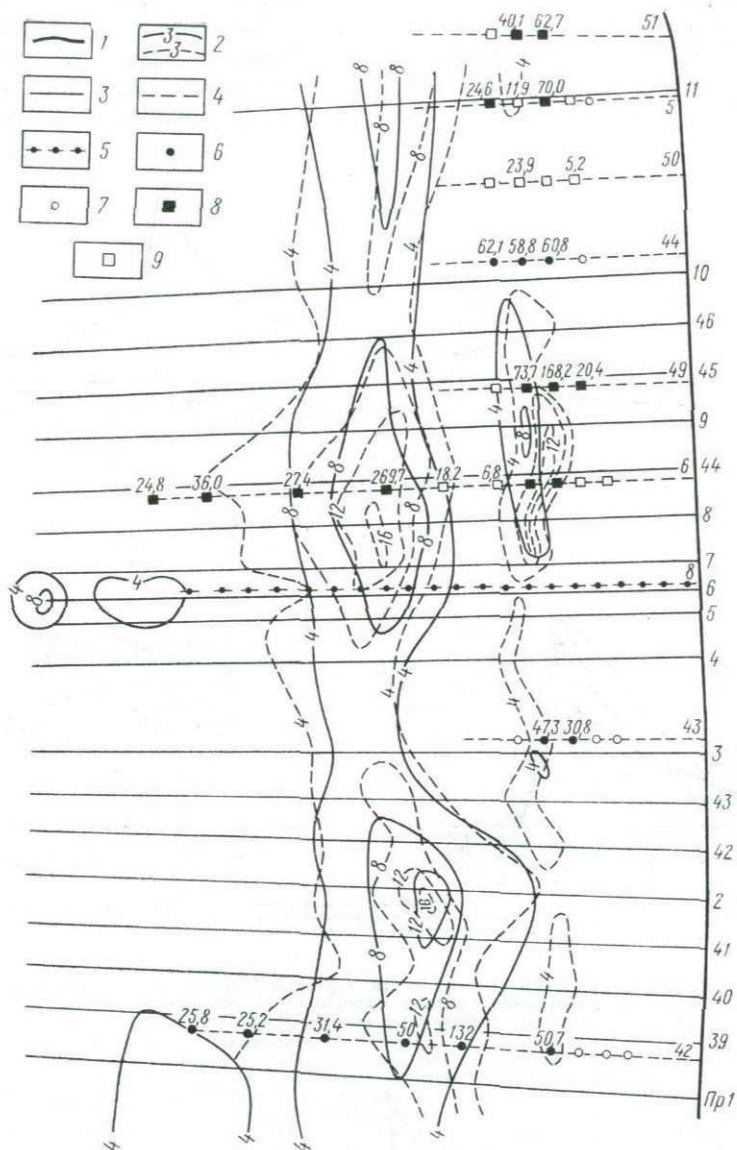


Рис. 24. Схема естественной радиоактивности современной россыпи по данным двух съемок с интервалом в 1,5 месяца (район Куршской косы, ю-в Балтика).

1 — береговая линия; 2 — изогаммы; профили: 3 — ВНИИЯГГ, 4 — горного института (МГИ), 5 — ВНИИМОРГЕО; данные по вибротрубке: 6 — рудные, 7 — забалансовые и пустые; данные по дночерпателю: 8 — рудные, 9 — забалансовые и пустые

геологическим опробованием участки повышенных содержаний минералов тяжелой фракции нашли свое отражение в данных радиометрии. Вторая полоса на глубинах 10—16 м по данным радиометрии имеет гораздо большую площадь развития. И, наконец, отдельные пятна повышенных значений фиксируются на

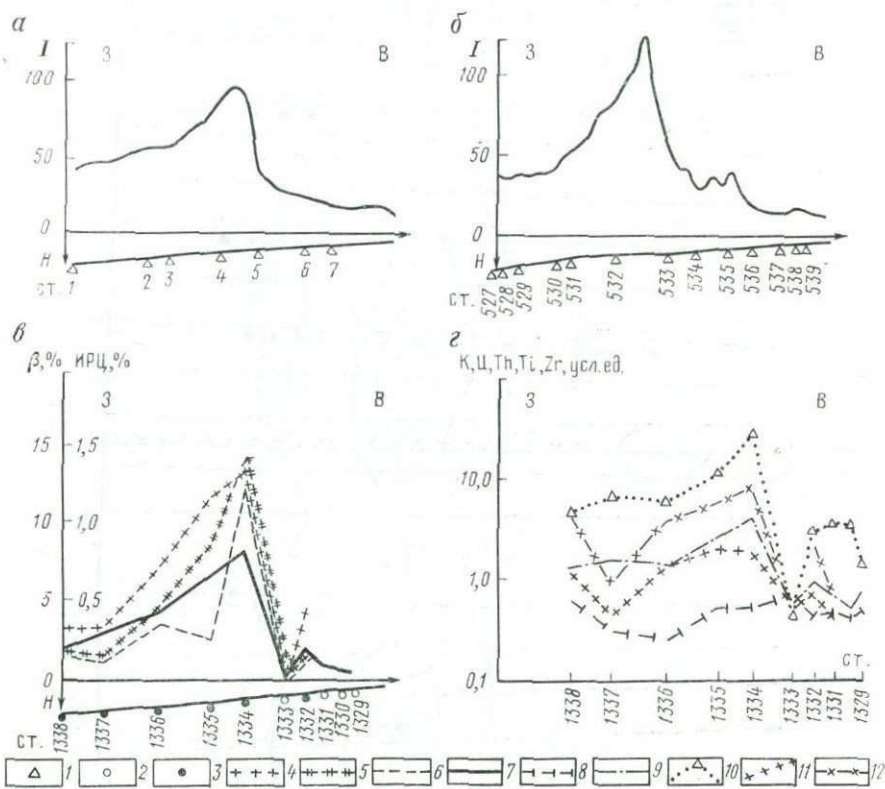


Рис. 25. Сопоставление интенсивности (в отн. ед) естественного гамма-излучения (а и б), минералогического опробования скважин подводного вибробурения (в) и лабораторных анализов образцов (г) россыпи Куршской косы.

а — профиль 1; б — профиль 39; в — профиль 42 с данными по содержанию ильменита, рутила, циркона (ИРЦ) и валового содержания минералов тяжелой фракции β поверхности и бурового (по скважинам вибробурения см. рис. 26) опробования; г — содержание урана, тория, калия, титана и циркония в поверхностных пробах профиля, 42.

1 — точки сбора поверхностных образцов; скважины подводного вибробурения; 2 — с забалансовыми содержаниями, 3 — с рудными; 4 — ильменит; 5 — рутил; 6 — циркон; 7 — минералы тяжелой фракции; 8 — калий; 9 — уран; 10 — торий; 11 — титан; 12 — цирконий

глубинах 18—22 м (профиль 1 и 39) и 20—22 м (профиль 6). Повторные исследования в этом же районе показали, что значительных изменений в плановом положении россыпей не наблюдается (см. рис. 24).

В плане профили 1 и 39, отработанные ВНИИЯГГом совместно с ВНИИМОРГЕО в 1968 г., расположены параллельно

друг другу (см. рис. 24). Между ними в том же направлении Московским горным институтом было проведено геологическое опробование дна вибропоршневой трубкой по профилю 42, с последующим минералогическим анализом образцов. В этих образцах во ВНИИЯГГе было определено содержание радия, тория и калия (гамма-спектрометрия), титана и циркония (гамма-активационными методами (рис. 25)).

Результаты бурения, выполненного Московским горным институтом (рис. 26) в районе морских радиометрических работ, показали, что в пределах верхних 25—30 см осадков имеют место значительные изменения в содержаниях ильменита, рутила и циркона — основных рудных компонент тяжелой фракции. Входящие во фракцию мелкого песка + крупного алеврита эти минералы либо обнажаются на дне (ст. 1334, 1335, 1336), либо перекрыты сверху маломощной пачкой (до 20 см) кварцевых песков, состоящих в основном из минералов легких фракций (ст. 1329, 1332, 1337).

Аналогичные данные получены и по району Юрмалциемс. Своеобразие этого района заключается в том, что здесь по данным подводной радио-

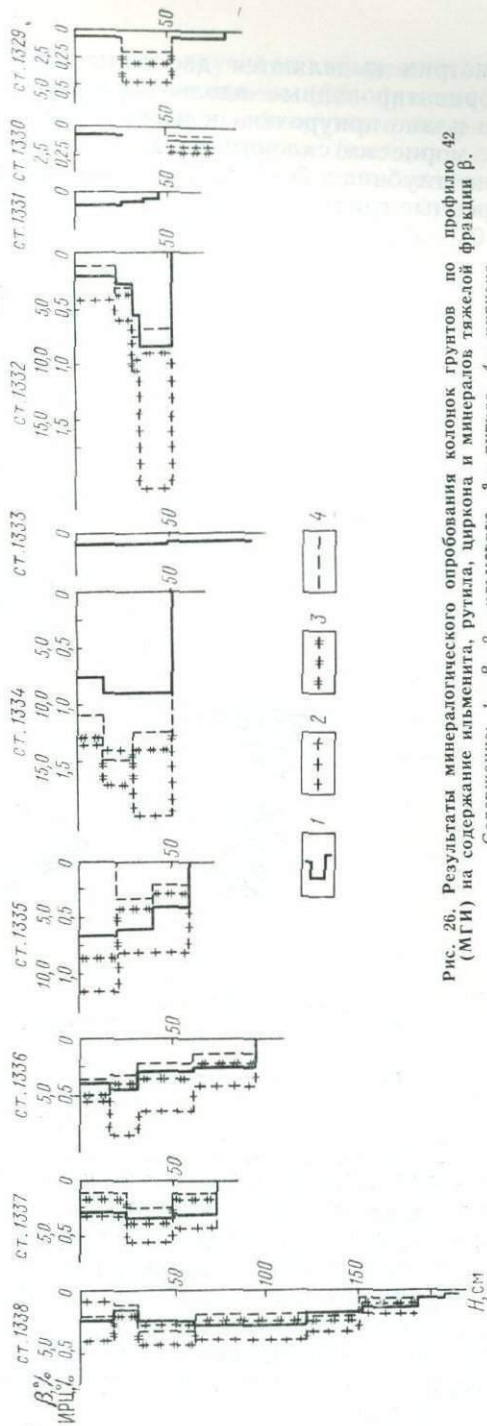


Рис. 26. Результаты минералогического опробования колонок грунтов по профилю 42 (МГИ) на содержание ильменита, рутила, циркона и минералов тяжелой фракции Р. Содержание: 1 — β, 2 — ильменит, 3 — рутил, 4 — циркон

метрии выделяются две зоны повышенной гамма-активности, ориентированные вдоль береговой линии. Одна, более узкая, в плане приурочена к изобате 2 м и пространственно совпадает с мористым склоном вала. Другая, более широкая, расположена на глубинах 3—5 м, за которыми начинаются подводные моренные гряды, где линзы песков выклиниваются.

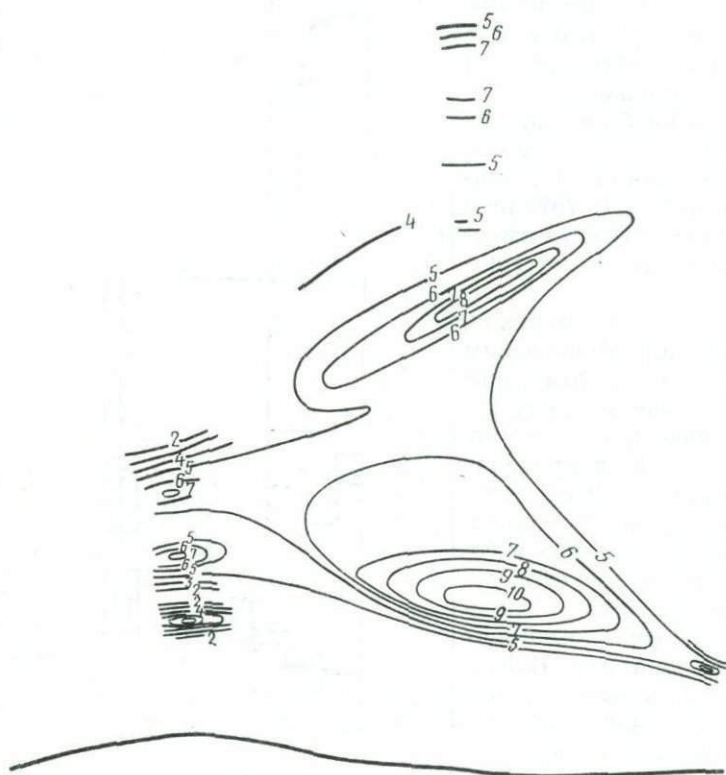


Рис. 27. Схема естественной радиоактивности (в усл. ед.) побережья у мыса Овиши

В районе мыса Овиши (рис. 27) данными радиометрии подтверждается деление потока на две ветви. Одна ветвь направлена к северо-востоку — в Ирбенский пролив; другая — к северу, вдоль западного побережья острова Сарема (Эзель).

Непрерывной радиометрической съемкой, проведенной по профилю, расположенному у Вислинской косы, близ границы с Польской Народной Республикой, также отмечается зона повышенных значений естественной радиоактивности. В плане эта зона имеет большую ширину, чем расположенные севернее по побережью.

Спектрометрия естественного гамма-излучения современных морских осадков россыпей районов Юрмалциемс (60 образцов) и Вислинской косы (9 образцов) позволила обнаружить корреляционную зависимость между суммой импульсов (площадью) фотопиков тория и радия и содержанием монацита, ильменита, циркона и тяжелой фракции. Величины коэффициентов корреляции и среднеквадратичных отклонений приведены в табл. 20.

Таблица 20

Коэффициенты корреляции данных гамма-спектрометрии и минералогических анализов (69 определений) по районам Юрмалциемс и Вислинской косы

Х	У	$r \pm \sigma$	T
Фотопик тория	Монацит	$0,9318 \pm 0,0158$	21,0145
	Циркон	$0,9165 \pm 0,0192$	18,7585
	Тяжелая фракция	$0,7005 \pm 0,0613$	8,0350
Фотопик радия	Монацит	$0,8870 \pm 0,0256$	15,7249
	Тяжелая фракция	$0,7752 \pm 0,0480$	10,0474
Тяжелая фракция	Ильменит	$0,8253 \pm 0,0383$	11,9648

В исследованных участках побережья от Вислинской косы на юге до мыса Овиши на севере, повсеместно наблюдается хорошо выраженная зависимость интенсивности естественного гамма-излучения от содержания титана, циркония и гафния в современных прибрежно-морских россыпях (рис. 28).

В процессе перемещения наносов происходит их дифференциация по плотности, форме и размерам зерен, в результате чего отдельные участки побережья приобретают индивидуальные минералогические характеристики. Так, для районов Вислинской и Куршской кос, а также Юрмалциемса наблюдаются четко расходящиеся регрессии в распределении ильменита, монацита и циркона в зависимости от валового содержания минералов тяжелой фракции.

Спектрометрия естественного гамма-излучения проводится в море и на пробах, отобранных по данным экстремальных значений естественной гамма-интенсивности. Пробы массой около 3 кг квартуются. После квартования одна половина пробы направляется на спектрометрию, а другая — в запас. После спектрометрии проба снова квартуется. Полученные в результате второго квартования пробы направляются на минералогический и гранулометрический анализы. В тех же навесках для внешнего контроля определяется содержание урана, радия, тория и

калия, а гамма-активационным анализом определяется содержание титана, циркония, гафния. Таким образом, обеспечивается необходимая воспроизводимость для проведения дополнительных исследований. Исходная навеска 750 г обеспечивает достаточную представительность для минералогических и гамма-активационных определений, что позволяет проводить корре-

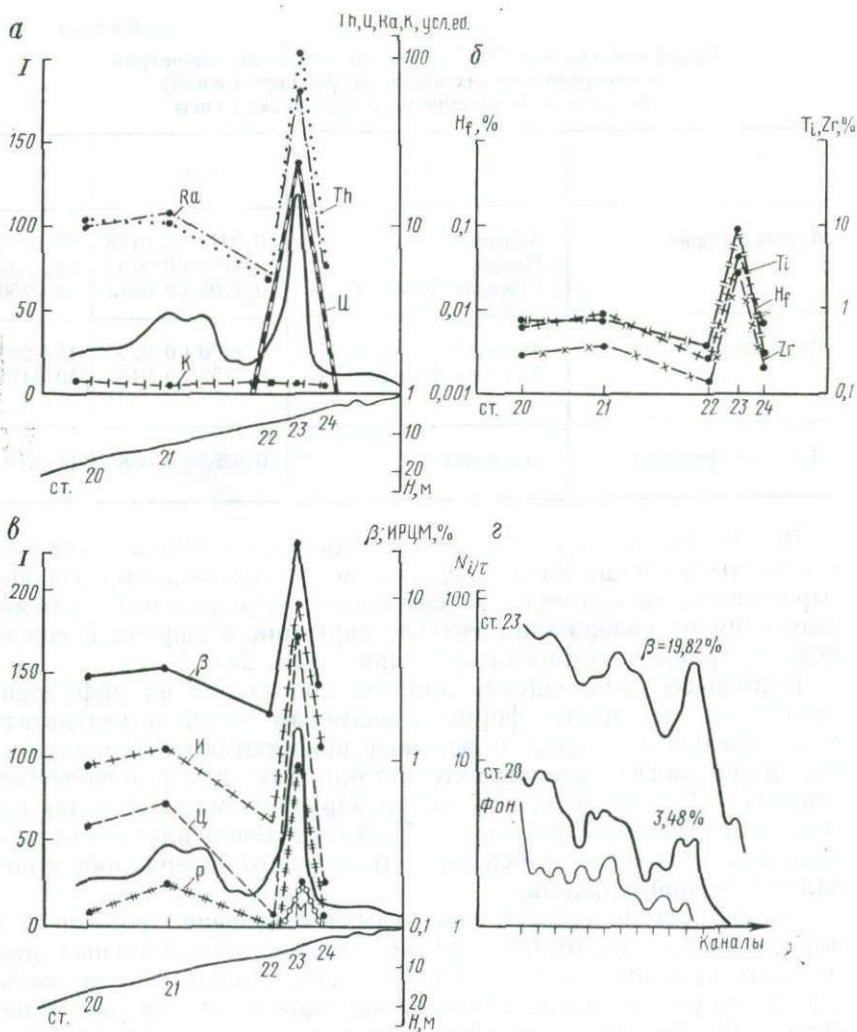


Рис. 28. Сопоставление данных непрерывной подводной радиометрии (в отн. ед.) с содержанием естественных радиоактивных изотопов (а), циркония, титана и гафния (б), минералогическим составом осадков (в), а также спектра естественного гамма-излучения осадков с различным валовым содержанием минералов тяжелой фракции на станциях 20 и 23 (в) в интервале энергий 1,78—2,62 МэВ.

Монацит — М, рутил — Р, циркон — Ц, ильменит — И, тяжелая фракция — β

ляцию данных этих анализов с данными гамма-спектрометрии. В среднем до 30% проб проходят внешние контрольные анализы.

Первоначально спектрометрия естественного гамма-излучения в поле выполнялась на СГС-1 и датчике NaI(Tl) размером 40×50 см. Такой сцинтиблок хорошо вписывается в габариты свинцового домика ДС-50, удобно транспортируется, прост и надежен в работе. Однако малый объем кристалла и небольшая навеска 300÷400 г снижали экспрессность исследований. Унификация механических узлов и деталей датчика МОРС на базе ФЭУ-56 с монокристаллами NaI(Tl) размером 80×80 мм и датчика гамма-спектрометра позволила повысить чувствительность лабораторных спектрометрических замеров проб, проводя их по методике, предложенной А. Л. Якубовичем и др. [72].

При использовании ДС-50 (монокристалл 40×50, навески пробы 350 г) за 1,5 часа измерения пробы с кларковыми значениями содержаний гамма-излучателей сумма импульсов в фотопике тория (2,45—2,90 МэВ) составляет величину около 150 имп, достигая в образцах с повышенным валовым содержанием минералов тяжелой фракции 1500 имп и более. Применение сцинтилляционного блока на монокристалле 80×80 мм в свинцовой защите, толщиной 50 мм (блоки БС-100) позволило, используя навеску до 1,5 кг, получать в тех же условиях суммы импульсов в фотопике от 800 имп (при валовых содержаниях минералов тяжелой фракции 3%) и выше.

В реальных условиях, без собственной развитой базы морских геологопоисковых работ, обычно приходится иметь дело с фондом образцов, по которым уже имеются литолого-минералогические определения. В этих случаях одной из возможностей улучшения эффективности регистрации является увеличение объема сцинтиллятора. Применение кристаллов больших размеров (160×160 мм) с колодцем (43×60 мм), в который помещается исследуемая проба, позволяет сохранить на достаточном уровне суммарную интенсивность в фотопике за счет некоторого ухудшения энергетического разрешения и отношения эффект/фон.

Контроль линейности шкалы спектрометра производится с помощью образцовых источников гамма-излучения цезия-137 ($E=0,66$ МэВ), иттрия-88 ($E_1=0,90$ МэВ; $E_2=1,84$ МэВ и $E_3=2,74$ МэВ) и кобальта-60 ($E_1=1,17$ МэВ; $E_2=1,33$ МэВ и $E_3=2,50$ МэВ). Для определения содержания естественных радиоактивных изотопов проводится измерение соответствующих эталонов. Опыт работ по указанной методике говорит о возможности определения в полевых условиях калия с погрешностью 15%, радия—25% и тория—20%.

Спектрометрия радия и тория улучшается при использовании двухкристального спектрометра для регистрации каскадных линий в режиме медленных суммарных совпадений (рис. 29).

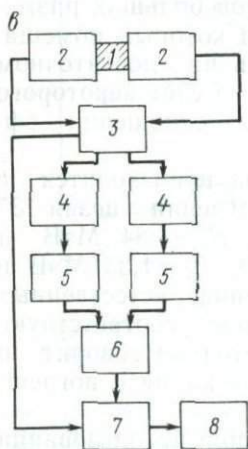
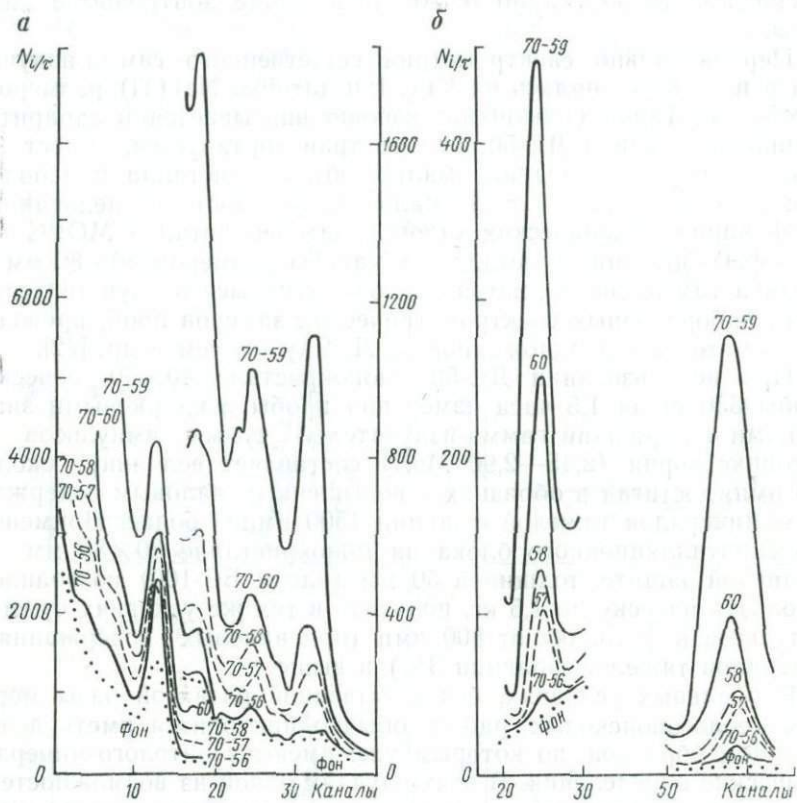


Рис. 29. Сопоставление аппаратных спектров спектрометра СГС-1 и двухкристального спектрометра совпадений. Спектры образцов: а — на СГС-1, б — на спектрометре совпадений; в — блок-схема спектрометра совпадений

Применяемая для этих измерений установка собирается из стандартных блоков. Исследуемый образец 1 помещается между двумя сцинтилляционными блоками 2. Импульсы с каждого блока поступают на два отдельных входа блока линейного суммирования 3. Идентичность усиления в обоих каналах обеспечивается подбором высокого напряжения на диодах ФЭУ. Суммарные импульсы после усилителей 4 поступают на входы одноканальных дискриминаторов 5. Их «окна» настроены на суммарные пики каскадов RaC ($1,120+0,609$ МэВ) и ThC'' ($0,583+2,614$ МэВ). Квантовый выход первого каскада — 0,19, второго — 0,3. С выходов дискриминаторов через блок медленных совпадений 6 импульсы подаются на схему управления многоканального анализатора 7. Параллельно на вход анализатора подаются импульсы с блока линейного суммирования (для амплитудного анализа). Анализатор отбирает и регистрирует только те импульсы, которые совпадают во времени с управляющими. Полученный таким образом спектр показан на рис. 29, б. Информация выводится на цифropечатающее устройство 8.

В качестве рабочих участков выбраны интервалы 0,9—1,2 и 2,4—2,8 МэВ для радия и тория соответственно. Спектры проб с различными содержаниями изотопов показаны на рис. 29, а. В использовании спектрометров совпадений привлекают простоты формы спектров, высокая избирательность в определении содержания урана (радия) и тория, а также низкая скорость счета фоновых импульсов, появляющихся за счет случайных совпадений. Последнее особенно важно при регистрации малых интенсивностей. Эталонирование проводится также по образцам с известными содержаниями радиоэлементов.

Определение содержания урана, радия, тория и калия может быть выполнено с применением Ge(Li) и Si ППД. На рис. 30 показаны спектры естественного гамма-излучения, полученные для одного из образцов россыпи Юрмалциемса. Здесь сопоставляются данные по фоновым и эффективным замерам, полученным с NaI(Tl) СБД размером 80×80 мм (время замера 90 мин) и Ge(Li) ППД объемом 30 см^3 (время замера 70 мин). По расчетам, проведенным О. В. Горбатьюком и В. В. Миллером, радий-ториевое отношение оказалось равным $(0,83 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$, радий-урановое (коэффициент радиоактивного равновесия) — $75 \pm 18\%$. Оценка содержания калия по данным ППД спектрометрии дала величину $0,055 \pm 0,004\%$.

Минералогическая ценность и эффективность изучения прибрежно-морских россыпей определяются не только большими запасами минерального сырья и его естественной регенерацией, но и возможностью комплексного использования. Так, при изучении обогатимости титанциркониевых песков морского происхождения в них было обнаружено тонкое золото [62]. Золото это весьма мелкое и пылевидное с размерами знаков от 0,05 до 0,25 мм, в основном темно-желтого цвета, пробы — 890.

2. При обогащении песков по флотационной схеме с доводкой коллективного концентрата магнитной и электрической сепарацией в сочетании с методами флотации и гравитации более высокое содержание золота наблюдается в рутиловом и цирконовом концентратах, а также в промпродуктах электрической сепарации магнитной и немагнитной фракций.

3. Существует принципиальная возможность флотационного извлечения золота из песков в голове процесса в самостоятельный концентрат, содержащий золота 25 г/т [62].

В настоящее время основным фактическим источником геологической информации являются образцы донных пород, извлекаемые с поверхности дна или из колонки вибропоршневой трубки. Ввиду дискретности этой информации при построении карт-графиков физических свойств пород и осадков проводится экстраполяция, которая, естественно, не может быть достаточно достоверной. Выполнение основных лабораторных анализов на берегу приводит к тому, что результаты исследований получают уже по прошествии значительного времени после возвращения судна из рейса. Поэтому не представляется возможным осуществлять своевременную корректировку программы исследований на основании только что отработанных маршрутов.

Естественная радиоактивность донных пород и современных морских осадков может рассматриваться как один из показателей их состава и геологического строения морского дна. Применение подводной гаммаметрии и проведение на ее основе подводного геологического опробования позволяет создать инструментальную, экспрессную и многоцелевую методику геологических исследований морского дна. Принципиальным достоинством этой методики является возможность получения достоверной непрерывной, опережающей и комплексной информации, что позволит значительно снизить степень неопределенности наших знаний о геологическом строении и составе пород морского дна.

Гамма-спектрометрия представляется необходимой для учета связи гамма-интенсивности и минералогического состава. Спектрометрия естественного гамма-излучения, выполняемая непрерывно по профилям (отдельно для уран-радиевой, ториевой и калиевой составляющих), позволяет минералогически дифференцировать осадки в зависимости от типов оруденения близлежащих участков материка. В результате металлогения берегов и морских прибрежных участков может быть изучена комплексно и взаимосвязанно.

Сопоставление карт-схем естественной радиоактивности (в интегральном или спектрометрическом виде) морских осадков с данными прямого геологического опробования и других геолого-геофизических (геохимических) методов позволяет получать представительные и достоверные предварительные данные для постановки детальных исследований.

Возможность проведения непрерывных измерений спектра

естественного гамма-излучения до 3 МэВ повсеместно в пределах шельфа делает этот метод весьма перспективным при изучении минерально-сырьевых ресурсов шельфовых зон.

Гаммаметрия прибрежных зон и образцов

Как было показано в предыдущих разделах, развитие естественных радиоизотопов в аксессуарных минералах тяжелой фракции (цирконе, монаците и др.) позволяет проводить изучение современных россыпей по их естественной радиоактивности *in situ*. В этом случае фиксируется естественное гамма-излучение верхних 30 ± 4 см осадков.

Изучение геологического строения Северо-Востока СССР началось сравнительно недавно. Как отмечают В. И. Павлов и Н. А. Шило [51], рудопоявления олова на северо-востоке представлены, главным образом, касситеритово-кварцевой и касситеритово-силикатной формациями, которые являются и основными россыпеобразующими. Эти и другие формации приурочены к вмещающим породам различного петрохимического состава (табл. 21). Месторождения касситеритово-силикатной

Таблица 21

Распределение месторождений олова
в зависимости от рудных формаций и вмещающих пород [31]

Формация	Песчаники и сланцы	Гранитоиды и дайки кислого и среднего состава	Эффузивы кислого и среднего состава	Карбонатные породы и скары	Амфиболиты	Конгломераты	Гнейсы и кристаллические сланцы	% от общего числа месторождений
Оловоносных пегматитов	28/5	56/21	—	—	—	—	16/60	9
Касситеритово-кварцевая	43/22	41/46	4/9	6/10	2/30	—	4/10	27
Касситеритово-силикатная	70/50	19/29	9/27	—	—	3/100	—	38
Касситеритово-сульфидная	55/21	6/4	33/55	6/23	—	—	—	19
Оловоносных скарных	16/2	—	—	68/72	16/70	—	—	6
Риолитовая	—	—	100/9	—	—	—	—	1
% от общего числа месторождений	52	21	12	7	2	1	3	100

Примечание. В числителе — в % от общего числа месторождений данной формации в породах различного состава; в знаменателе — в % от общего числа месторождений различных формаций в породах данного состава.

формации и связанные с ними аллювиальные россыпи касситерита могут сопровождаться литохимическими и биохимическими ореолами рассеяния бора [28].

В качестве объекта исследований была выбрана касситеритовая россыпь, сложенная продуктами абразии коренных пород — кварц-турмалин-касситеритовых жил, слагающих прибрежную возвышенность. Исследовавшими район геологами описывается несколько этапов его формирования.

В истории формирования кайнозойских отложений района выделяется два крупных этапа — континентальной (эоцен-плиоценовый), когда формируется кора выветривания и происходит ее частичный размыв и накопление толщи аллювиальных отложений, и континентально-морской (плиоцен-четвертичный). В антропогенное время доминирует отступление моря, что привело к развитию на побережье террас, протяженных морских осушек, увеличению крупности современных осадков (верхи разрезов бурового опробования) и т. п.

Изучение распределения естественной радиоактивности, бора и фтора в осадках современной прибрежно-морской касситеритовой россыпи показало определенную зависимость содержания их в осадках. Результаты анализов образцов, любезно предоставленных нам А. А. Емельяновым и К. В. Яблоковым, характеризуют распределение по двум профилям, проходящим вблизи центральной части россыпи. По этим данным прокоррелирована величина естественной радиоактивности с содержанием олова, бора и фтора (табл. 22).

Прямое определение олова в образцах наряду с ядерным гамма-резонансным методом (ЯГР) может проводиться и нейтронно-активационным анализом. По данным [77], такие определения проводятся как с полупроводниковым германий-литиевым детектором объемом 18 см^3 , так и с детектором на базе сцинтиллятора — монокристалла иодистого натрия, активированного таллием, размером $9 \times 9 \text{ см}$. Эти определения реализуются пока только в лабораторных условиях.

В полевых условиях касситеритсодержащие зоны можно выявить на основе спектрометрии естественного гамма-излучения. Предпосылкой к этому является развитие калиевого метасоматоза [31]. Действительно, как отмечается по данным табл. 22, коэффициент корреляции калия и олова $0,5830 \pm 0,1070$. Критерий Стьюдента для данной выборки, равный 4,3, позволяет считать эту тенденцию устойчивой.

Корреляционная зависимость олова и бора оценивается $0,6452 \pm 0,0946$ при величине критерия Стьюдента 5,06. Имеющийся опыт борометрии с использованием нейтронных источников [65 и др.] позволяет рекомендовать этот метод как один из вспомогательных при поисковых работах на россыпях. По-видимому, связь бора с калием и торием найдет свое отражение и при спектрометрии естественного гамма-излучения.

Коэффициенты корреляции данных минералогических и элементных определений по двум профилям касситеритовой россыпи (38 определений)

X	Y	$r \pm \sigma$	T
Калий	Уран	$0,2376 \pm 0,1530$	1,468
	Торий	$0,5330 \pm 0,1161$	3,779
	Бор	$0,6160 \pm 0,1006$	4,692
	Олово	$0,5830 \pm 0,1070$	4,306
	Фтор	$-0,0068 \pm 0,1622$	-0,0411
	Цирконий	$0,4066 \pm 0,1353$	2,6707
Цирконий	Уран	$0,6278 \pm 0,0982$	4,8401
	Торий	$0,8416 \pm 0,0472$	9,3531
	Бор	$0,5727 \pm 0,1090$	4,1918
	Олово	$0,2463 \pm 0,1523$	1,5249
	Фтор	$0,1079 \pm 0,1603$	0,6517
Фтор	Уран	$0,3473 \pm 0,1426$	2,2222
	Торий	$0,0990 \pm 0,1606$	0,5971
	Бор	$0,1977 \pm 0,1558$	1,2102
	Олово	$0,3078 \pm 0,1468$	1,9417
Олово	Уран	$0,3419 \pm 0,1432$	2,1836
	Торий	$0,3881 \pm 0,1377$	2,5271
	Бор	$0,6452 \pm 0,0946$	5,0669
Бор	Уран	$0,4344 \pm 0,1315$	2,8943
	Торий	$0,6339 \pm 0,0970$	4,9187
Торий	Уран	$0,4040 \pm 0,1357$	2,6501

Для поисковых работ на современных прибрежно-морских касситеритсодержащих россыпях представляется целесообразным применение комплекса ядерно-геофизических методов, состоящего из непрерывной гаммаметрии с разделением калиевой и ториевой составляющих и непрерывной борометрии. Данные о поверхностных распределениях не могут экстраполироваться на большие расстояния в плане (не более 300 м) и особенно в разрезе.

Из акцессорных минералов россыпей на шельфе Японского моря наибольший интерес представляет олово. Подчиненное значение имеют магнетит, титаномагнетит, монацит, циркон. Систематическое геолого-геофизическое изучение шельфов дальневосточных морей СССР началось сравнительно недавно.

Многими исследователями в Приморье выделяются перспективные на касситерит зоны. Эти выводы основываются, как правило, на изучении расположенных на побережье касситеритоносных массивов гранитоидов, подвергающихся интенсивной водной и золотой абразии [31]. Другие исследователи считают образование современных россыпей касситерита прибрежно-морского генезиса весьма проблематичным [1]. К неогеновым галечникам северного Сахалина могут быть приурочены морские россыпи олова в районах, примыкающих к Татарскому проливу. И, наконец, районы шельфа, примыкающие к Шантарским островам, благоприятны для обнаружения выходов на морское дно фосфорсодержащих образований.

Изучение минералогического состава тяжелой фракции в морских осадках шельфа Южного Приморья, приведенное в работе [15], показало, что здесь могут быть четко выделены два района — западный и восточный. Граница между этими районами проводится по восточному побережью Уссурийского залива в субмеридиональном направлении. Отмечается отсутствие касситерита на западном участке. Для восточного характерно наличие циркона и других минералов-аксессуаров гранитоидов, а также большое количество жильных минералов, поступающих, по-видимому, из источника, абрадируемого морем непосредственно на подводном склоне. Минералогический состав тяжелой фракции осадков отражает геологическое строение области питания.

Исследования возможности выявления современных золотоносных россыпей были проведены в 60-х годах в Южном Приморье и по образцам с шельфа у северо-восточной оконечности о. Сахалин. Особенностью минерогении Южно-Приморской зоны является развитие золота как в коренных жилах, так и в россыпях. Наряду с континентальными россыпями встречаются также и морские.

В конце 60-х годов при натурном опробовании плавающей лаборатории на базе автомобиля-амфибии были проведены исследования по радиометрическому картированию северной части бухты Наездник (о. Аскольд). Предметом исследований являлось изучение связи золотоносности и естественного гамма-поля. Выбор этого участка не был случайным.

«Горным инженером Перрэ получено разрешение на разработку морских золотоносных площадей близ берегов о. Аскольда. Им уже заявлены две площади в компании с известным золотопромышленником Д. А. Поповым. Разработка предполагается драгою», — сообщал «Вестник золотопромышленности» в 1898 г. [13]. Однако этой идее не суждено было сбыться.

«В 1898 г. была заявлена как морская россыпь бухта Наездник. Основанием к этому послужило убеждение лиц, знакомых с работами Основательного прииска, что россыпь последнего продолжается на песчано-галечной береговой косе и ниже, под

уровень моря. Бухту предполагалось разведать с плотов черпаками. Разведка эта не была осуществлена, и в настоящее время упомянутая заявка отошла в казну. Между тем, наличие морской россыпи у северного берега бухты Наездник — весьма вероятно. За это говорит и короткое протяжение долины, по которой расположен отвод Основательного прииска, и сравнительно широкий вынос этой долины, и пересечение ею свиты золотоносных жил Аскольдовского рудника, и многочисленные хотя и тонкие жилы пиритсодержащего кварца в выветрелых гранитных скалах северного берега бухты, и наконец — значительная переработка материала на отмели этой бухты» [18].



Рис. 31. Схема естественной радиоактивности (в усл. ед.) донных грунтов бухты Наездник (о. Аскольд)

повышенных значений гамма-поля ($>4,0$ мкР/ч). В пределах исследованного района гамма-поле имеет значение от 1 до 2,7 мкР/ч.

Исследование гамма-поля прибрежно-морской россыпи золота, приуроченной к отложениям бухты, имеющей в плане форму неправильного треугольника, было проведено также с помощью автомобиля-амфибии в 1968 г. Эти работы входили в общий комплекс исследований, направленных на изучение приустьевых участков, впадающих в бухту водотоков, исследование пляжа и прилегающей части подводного склона до первого подводного вала и самого подводного склона.

Буровыми работами в 60-х годах на акватории бухты установлена зараженность золотом практически всех разностей осадков, слагающих дно бухты. Было отмечено, что в морских отложениях золото тяготеет к приповерхностному слою осадков, местами перекрытому маломощными илами. На рис. 32 представлены схема распределения золота на подводном склоне бухты и схема интенсивности естественной радиоактивности северо-восточного участка.

Анализ материала по формированию золотоносной россыпи и отображение этого процесса в данных гаммаматрии позволяют сделать некоторые выводы. Струйчатому строению россыпи отвечает аналогичная ей (вдольбереговая) ориентация полос

повышенных значений интенсивности гамма-излучения. Отмечается также тяготеющая к восточному берегу вдольбереговая струя россыпи с повышенным (от 500 до 1000 усл. ед.) содержанием золота. Часть ее, по-видимому, отображается в гамма-поле. При сопоставлении данных рис. 32 необходимо учитывать,

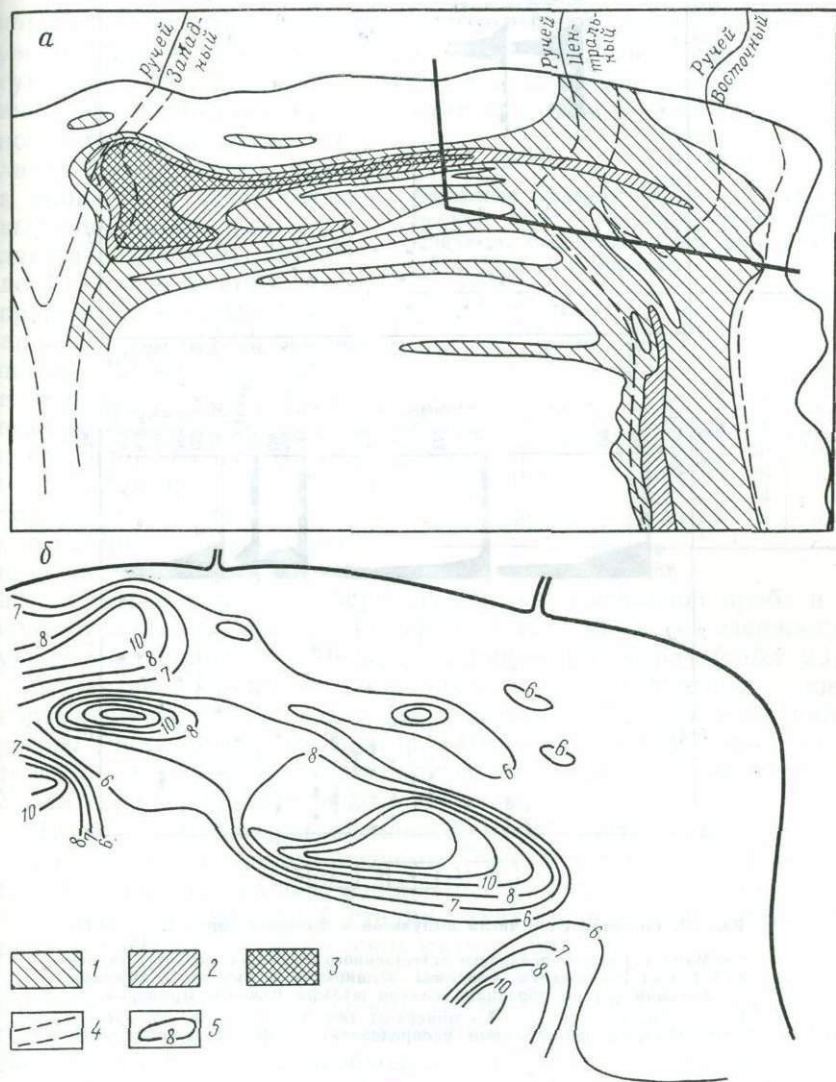


Рис. 32. Схемы распределения золота (а) и естественной радиоактивности (б) донных грунтов на подводном склоне бухты.

Вертикальное распределение содержания золота: 1 — малое, 2 — среднее, 3 — повышенное; 4 — контуры донн погребенных долин; 5 — изолинии естественной радиоактивности в усл. ед.

что золотометрия отображает результаты буровых работ, а гаммаметрия — естественную радиоактивность верхних 30 см осадков.

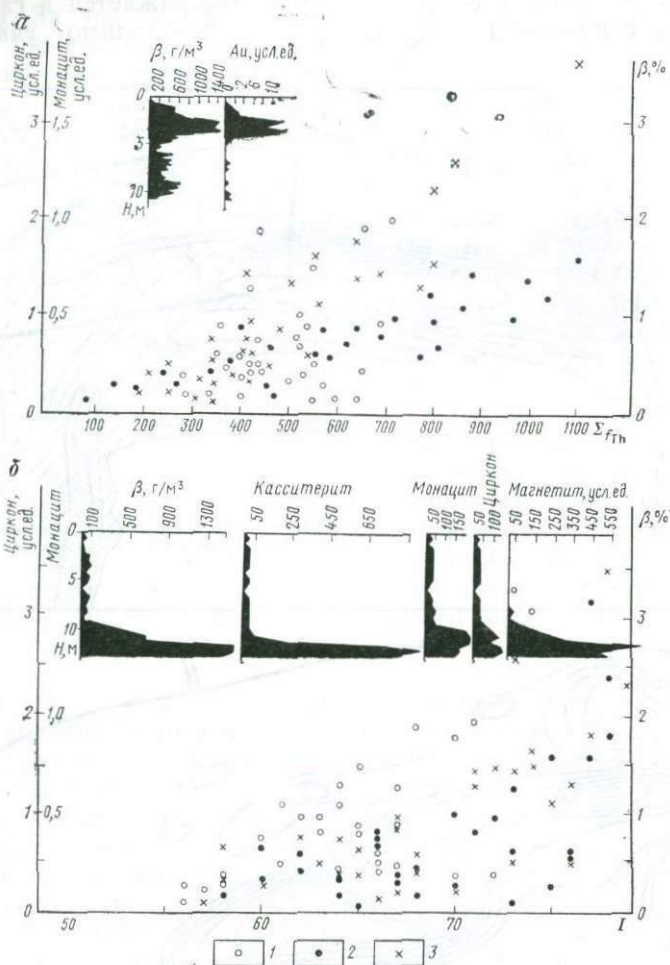


Рис. 33. Сопоставление числа импульсов в фотопике тория Σf_{Th} (2,45–2,9 МэВ) (а) и интенсивности естественного гамма-излучения I (в отн. ед.) (б) от содержания монокцита и циркона и минералов тяжелой фракции (β) по образцам осадков шельфа Южного Приморья. 1 — циркон, 2 — монокцит, 3 — минералы тяжелой фракции. На врезках сопоставлены вертикальные распределения исследуемых компонент

Проведенными в 60-х годах у южного побережья Приморья подводными радиометрическими исследованиями не выявлено определенной связи естественной радиоактивности современных морских осадков с их золотоносностью. По-видимому, в процессе

миграции, будучи вовлеченным в слой волновой переработки, золото достигает «плотика», где и оседает вместе с другими минералами тяжелой фракции. Такое объяснение основано на изучении вертикального распределения золота, минералов тяжелой фракции, касситерита, монацита, циркона и магнетита в аксессуариях осадков побережья Японского моря (рис. 33).

При вертикальном зондировании вероятность совместного обнаружения золота и минералов тяжелой фракции, естественно, увеличивается. В этих случаях методы гамма-спектрометрии могут дать дополнительные данные по выявлению «надплотиковых» отложений, в которых может быть обнаружено повышенное содержание золота. Увеличение содержания золота в процессе естественного шлихования осадков не является случайным. Эта тенденция имеет место и в распределении естественной радиоактивности. Так, в сером шлихе осадков, отобранных в северной части бухты Назездник, содержание урана превысило его содержание в исходной пробе в 6 раз, а тория — в 5 раз. Содержание калия, наоборот, уменьшилось почти в 3 раза. Для

другого района работ содержание калия в исходной пробе и в концентратах оказалось примерно одинаковым. Содержание урана увеличилось в 5—6 раз, а тория — в 4—5 раз (табл. 23).

Развитие касситерита, монацита, реже вольфрамита и шелита отмечается в аксессуариях современного аллювия по побережью Японского моря. Благоприятным признаком можно считать также оловянную минерализацию гранитов Поворотного, Успенского и Валентиновского массивов.

По-видимому, поиски оловоносных зон будут связаны с выявлением участков, характеризующихся повышенной интенсивностью естественного гамма-излучения. Представляется перспективным проведение на начальной стадии таких исследований рекогносцировочных радиометрических съемок [53].

Дальнейшие исследования целесообразно проводить путем изучения спектра естественного гамма-излучения и элементного состава образцов, как это было показано на примере Балтийского моря. При этом необходимо учитывать разницу в удельных весах минералов и гидродинамических режимах Балтики и Приморья.

Воздействие открытого моря, интенсивно взмучивающего прибрежные осадки, привело к тому, что мощность слоя волно-

Таблица 23

Изменение содержания К, U, Th, Au (в усл. ед.) в исходных пробах, сером шлихе и концентратах по двум бухтам Приморья

Пробы	К	U	Th	Au
Исходная	1,4	0,2	6	1,0
Концентрат 3	1,2	1,2	28	20,0
Концентрат 2	1,1	1,2	30	10,0
Концентрат 1	1,1	1,0	26	1,6
Исходная	1,5	0,2	4	
Серый шлих	0,5	0,6	24	5,0

вой переработки здесь значительно выше, чем на Балтике. Бóльшей является и плотность касситерита. Просеиваясь сквозь толщу взмучиваемых осадков, они имеют тенденцию концентрироваться над слоями типа «плотиков» либо «псевдоплотиков». Именно в этом следует искать причину невысокой корреляционной зависимости валового содержания минералов тяжелой фракции от суммы импульсов в фотопике тория. Недостаточно еще изучена способность касситерита к избирательному выкрашиванию. Все это создает дополнительные трудности при интерпретации данных морских гамма-спектрометрических исследований.

Изученные до 1969 г. аллювиальные россыпи о. Сахалина связаны с размывом рудных тел внеформационных экзотических минеральных типов. Здесь установлены чрезвычайно мелкие россыпи, рудопоявления и шлиховые ореолы золота. Россыпи узкоструйчатые с невыдержанным гнездовым распределением золота.

Лабораторный анализ проб, отобранных М. А. Шпеталенко на шельфе у северо-восточной оконечности о. Сахалин, показал наличие золота в ряде проб. Однако здесь не представилось возможным зафиксировать связь золотоносности с содержанием циркония, гафния (табл. 24) и с естественной радиоактивностью, цирконом и монацитом (табл. 25).

В Охотском море, севернее о. Сахалин, от южной оконечности о. Чкалов параллельно косе в направлении мыса Перовского на расстоянии 4,5—5 км от берега пройден профиль, на котором гамма-активность донных грунтов варьирует от 2,5 до 3,5 мкР/ч. На отдельных участках, длиной от нескольких десятков до сотен метров, наблюдается увеличение гамма-активности до 5—6 мкР/ч. На расстоянии 15 км северо-восточнее мыса Перовского пройден профиль, на котором зарегистрирована гамма-активность от 2,2 до 2,8 мкР/ч с увеличением на отдельных участках до 4 мкР/ч. На следующем профиле отмечается гамма-активность от 2,8 до 3,5 мкР/ч с возрастанием в начале профиля до 5,2 мкР/ч. Этот профиль ориентирован в северо-западном направлении от мыса Куприянова до мыса Александра.

На основании изложенного можно считать, что от залива Счастья до залива Рейнике наблюдается дифференциация гамма-поля от 2,2 до 6 мкР/ч. Отобранные образцы донных осадков представлены, в основном, песком разной зернистости с включениями ракуши и детрита. Мелкозернистые разновидности песка, как показали лабораторные исследования, обладают повышенной гамма-активностью, характеризующейся значениями 4—4,8 мкР/ч. По данным исследований, проведенных в заливе Александры, между островами Прокофьева и Меньшикова, в южной части залива Академии, у п-ова Тугурский, в заливе Ульбанский и в заливе Николая отмечены изменения гамма-ак-

Таблица 24

Содержание золота, циркония и гафния (в усл. ед.) в современных осадках шельфа у северо-восточного побережья о. Сахалин

Au	Zr	Hf
—	10	30
2	15	35
1	5	5
1	15	30
—	20	35
—	30	15
—	30	20
—	10	15
—	10	—
2	10	15
—	20	35
—	30	60
1	10	50
—	60	60
—	5	30
—	10	90
—	10	100
1	10	70
—	50	—
—	50	—
—	30	—
—	45	—
—	40	—
10	10	—

Таблица 25

Содержание калия, тория, золота, циркона и монацита (в усл. ед.) в современных осадках шельфа у северо-восточного побережья о. Сахалин

K	Th	Au	Циркон	Монацит
18	30	2	28	—
7	30	—	—	—
22	50	2	28	—
19	40	2	45	—
17	50	1	25	—
21	30	2	110	—
25	30	1	270	—
14	30	—	50	—
34	100	4	—	—
38	30	2	—	—
27	50	—	—	—
27	40	3	100	500
27	30	—	50	—
32	30	2	20	—
10	30	2	20	—
25	30	—	250	—
32	30	—	25	—
30	30	1	—	—
29	30	—	—	1
12	30	—	50	—
10	30	—	40	—
11	30	—	30	—
11	30	1	—	—
27	50	—	—	9
26	30	—	60	40
23	30	—	120	600
26	60	—	20	—
9	30	10	—	—

тивности осадков в пределах 1,3—3,5 мкР/ч. К югу от о. Большой Шантар (бухта Яшкина) осадки представлены галечным и песчаным материалом, который имеет гамма-активность 1,8 и 2,4 мкР/ч соответственно. Южная часть Удской губы характеризуется значениями гамма-активности 2—2,5 мкР/ч. К северу гамма-поле ослабевает до 1,5 мкР/ч. В восточной части Удской губы наблюдается гамма-активность 1,6—2 мкР/ч. В проливе Северный гамма-активность варьирует от 1,5 до 1,8 мкР/ч.

В целом, в пределах южной части Охотского моря отмечается дифференциация естественного гамма-поля в пределах от 1,1 до 6 мкР/ч. Мелкозернистые песчаные осадки характеризуются повышенной гамма-активностью (4—4,8 мкР/ч), среднезер-

нистые пески имеют гамма-активность 3—3,5 мкР/ч, крупнозернистый темно-зеленый песок — 1,6 мкР/ч. Галечному материалу свойственна низкая активность (1,5—2 мкР/ч), но в зависимости от присутствия в пробе песчано-глинистого материала значения гамма-активности могут изменяться.

Работами, проведенными ВНИИЯГГ совместно с Дальневосточным геологическим институтом под руководством А. А. Емельянова, было исследовано методом интегрального счета около 500 км профилей и отобрано около 300 проб донных осадков.

Сопоставление содержания основных радиоактивных элементов по образцам осадков, отобраным на шельфе Охотского и Японского морей, приведено в табл. 26.

Таблица 26

Средние значения содержания основных радиоактивных элементов (в %) по данным лабораторного гамма-спектрометрического анализа для районов Охотского и Японского морей

Моря, районы	K	Ra·10 ¹¹	Th·10 ⁴
Охотское море:			
Район I	2,3	1,9	3,4
Район II	2,2	1,8	3,2
Залив	2,5	2,1	3,3
Бухта	1,9	1,7	3,1
Японское море:			
Северная бухта	$\frac{1,5-5,2}{3,9}$	$\frac{0,2-10,7}{4,0}$	$\frac{3,2-22,3}{7,5}$
Южная бухта	$\frac{1,5-2,8}{2,4}$	$\frac{1,0-4,6}{2,3}$	$\frac{2,1-7,0}{4,4}$

Примечание. Для дроби в числителе указаны пределы содержаний элементов, в знаменателе—средние значения.

Радиометрическими исследованиями на шельфе Японского моря между мысом Гранитный и бухтой Мелководная изучено поле естественной радиоактивности с модальными значениями, близкими к полученным ранее на Каспийском и Азовском морях. По 1137 данным модальное значение равно 3,25 мкР/ч при незначительной правой косости кривой распределения. Для района от мыса Белявского до мыса Низменного модальное значение по 1612 определениям получено равным 3,75 мкР/ч. Аналогично и для россыпей юго-восточной части Балтийского моря отмечается ряд характерных значений 2,75; 3,75 и 4,8 мкР/ч.

Определение золота, гафния, циркония и титана активационными методами

Оценка перспектив металлоносности шельфовых зон и изучение условий формирования современных прибрежно-морских россыпей представляет сложную комплексную проблему. И хотя речь идет об освоении принципиально новой области развития полезных ископаемых, можно наметить и зачатку определить научные, технические и экономические основы изучения и освоения минерально-сырьевой базы акваторий.

Использование достаточно мощных потоков нейтронов как от малогабаритных скважинных генераторов, так и от изотопных нейтронных источников (типа калифорния-252) представляет необходимую основу для проведения *in situ* анализа многих элементов, встречающихся в породах морского дна и в современных морских осадках. По-видимому, целесообразно проведение ядерно-геофизических исследований для определения элементного состава уже на предпоисковом этапе. Становится возможным широкое вовлечение экспрессных и достоверных инструментальных методов изучения элементного состава подводных россыпей, динамики их формирования, развития, эксплуатации и регенерации. По имеющимся данным, проведение таких исследований может начинаться с непрерывной гаммаметрии, сопровождаемой отбором проб в экстремальных точках гамма-поля и элементным ядерно-геофизическим анализом *in situ* как на станциях, так и непрерывно по профилю. Этот анализ проводится путем активации донных пород потоком нейтронов и исследованием спектров наведенного и захватного гамма-излучения. Наведенная активность регистрируется стандартными многоканальными анализаторами в амплитудно-временном режиме. Идентификация элементов проводится на основе сопоставления спектров гамма-излучения от эталонных образцов и от исследуемых субстратов.

Активационный анализ золотосодержащих пород базируется на ядерных реакциях, имеющих место при взаимодействии пород с нейтронами, имеющими энергию 14 и 3 МэВ, а также с тепловыми (0,025 эВ) нейтронами. Возникающий в результате реакции $^{197}\text{Au} (n, 2n) ^{196}\text{Au}$ от нейтронов с энергией 14 МэВ изотоп ^{196}Au имеет период полураспада 5—6 сут и испускает гамма-кванты с энергией 0,33—0,36 МэВ. Используя поток 10^8 (нейтр.·см⁻²)/с, можно определять химически выделенное золото с порогом чувствительности около $50 \cdot 10^{-4}\%$ [115]. Определение золота в природных образцах затрудняется интерферирующими реакциями на кремнии, кислороде и других породообразующих элементах. Влияние хлора, повсеместно распространенного в морской воде, будет рассмотрено ниже. Некоторые трудности вызваны также «самотермализацией» нейтронов, что

на практике приводит к гораздо более сложным спектрам, чем рассчитанным теоретически.

При облучении потоком нейтронов с энергией 3 МэВ имеет место реакция $^{197}\text{Au} (n, n') ^{197m}\text{Au}$. Метастабильный изотоп ^{197m}Au распадается с периодом полураспада 7,2 с, испуская гамма-кванты с энергией 0,13 и 0,28 МэВ. Используя поток 10^7 (нейтр.·см⁻²)/с для облучения в течение 30 с при такой же экспозиции, по пику 0,28 МэВ с точностью 50% были определены пороги обнаружения химически выделенного золота на уровне $200 \cdot 10^{-4}\%$ [115]. Применение нейтронов с энергией 3 МэВ может несколько снизить интерференцию матрицы за счет исключения реакций на быстрых нейтронах с кремнием и кислородом, порог которых превышает 3 МэВ. Увеличение плотности потока нейтронов и применение циклической активизации наметает пути к увеличению чувствительности метода.

Образующийся в результате реакции на тепловых нейтронах $^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$ изотоп ^{198}Au имеет период полураспада 2,7 сут и испускает гамма-кванты с энергией 0,412 МэВ. Присутствующие в золотосодержащих рудах натрий, магний, кальций, титан, ванадий, марганец, медь, ниобий, серебро и торий дают сразу же после облучения их потоком тепловых нейтронов наведенную гамма-активность, гораздо большую, чем золото. Но поскольку многие из них имеют период полураспада, меньший периода полураспада ^{198}Au , определение его оказывается возможным после некоторого времени, необходимого для того, чтобы распались изотопы, обладающие меньшим периодом полураспада. За исключением ^{24}Na и ^{56}Mn гамма-активность большинства интерферирующих изотопов спадает ниже уровня фотопика ^{198}Au меньше чем за 1 ч (рис. 34, а) [115]. Измерение наведенной активности образца руды массой 50 г, содержащего золота 143 г/т, в потоке $5 \cdot 10^6$ (т. нейтр.·см⁻²)/с (активация — 15 мин, замер — по 2 мин после 6- и 24-часового интервалов соответственно) показывает принципиальную возможность прямого определения содержания золота (рис. 34, б).

Как показано авторами работы [115], по изменению фотопика 0,412 МэВ от растворов золота [поток $5 \cdot 10^6$ (т. нейтр.·см⁻²)/с, облучение — 15 мин, замер — 25 мин после трехчасовой выдержки] можно сделать вывод о практически линейной связи измеряемой гамма-активности и содержания золота даже в области низких концентраций (рис. 34, в). Введение поправок на флуктуации нейтронного потока и учет фона позволили оценить стандартное отклонение и коэффициент вариации. Как показано на рис. 34, г, с коэффициентом вариации 50% может быть определено содержание золота в растворе около 0,0006% [115].

Указанная методика может быть применена и для определения магния, алюминия, кремния, серы и железа в породах морского дна и в современных морских осадках.

Захватное (быстрое) гамма-излучение с энергией меньше 10 МэВ, возникающее мгновенно при облучении вещества тепловыми нейтронами, имеет характерный спектр и может быть использовано для анализа *in situ* пород морского дна и современных морских осадков. Этот метод привлекателен также уменьшением опасности облучения окружающего пространства

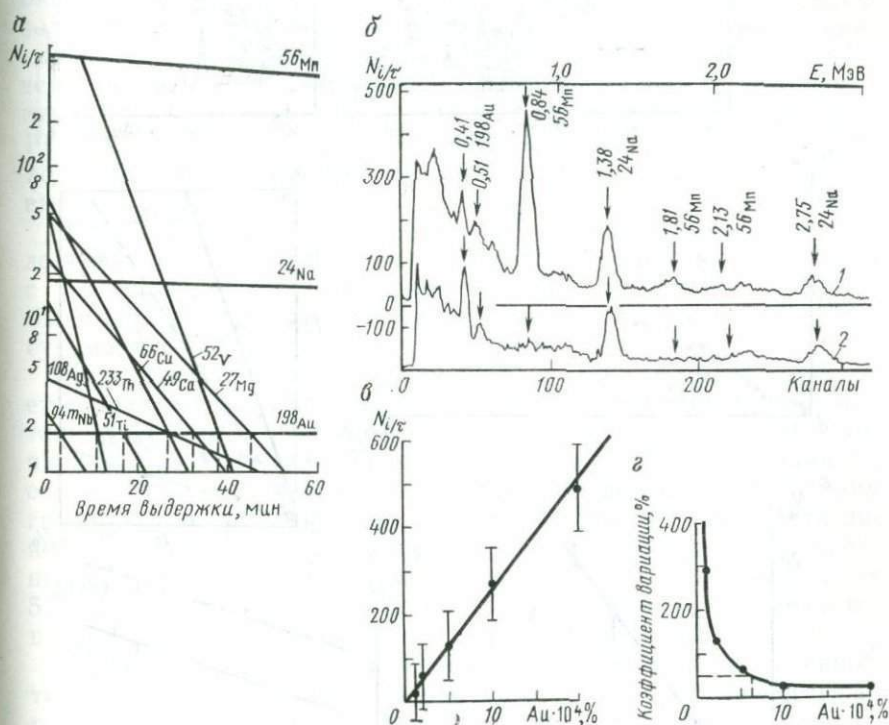


Рис. 34. Результаты нейтронного активационного анализа золота [115].

а — изменение наведенной гамма-активности изотопов элементов, встречающихся вместе с золотом (поток тепловых нейтронов — 10^6 (нейтр. · см⁻²)/с; (время облучения — 10 с); б — спектры наведенной гамма-активности рудных образцов после 6- (1) и 24-часовой (2) выдержки соответственно; в — связь относительной наведенной гамма-активности с содержанием золота в образце; г — зависимость коэффициента вариации от содержания золота

и живых организмов, а также увеличением диапазона исследуемых короткоживущих изотопов.

Если для проведения нейтронных активационных измерений оказались пригодными сцинтилляционные блоки детектирования (СБД), то развитие методов, основанных на исследовании гамма-излучения радиационного захвата нейтронов, первоначально

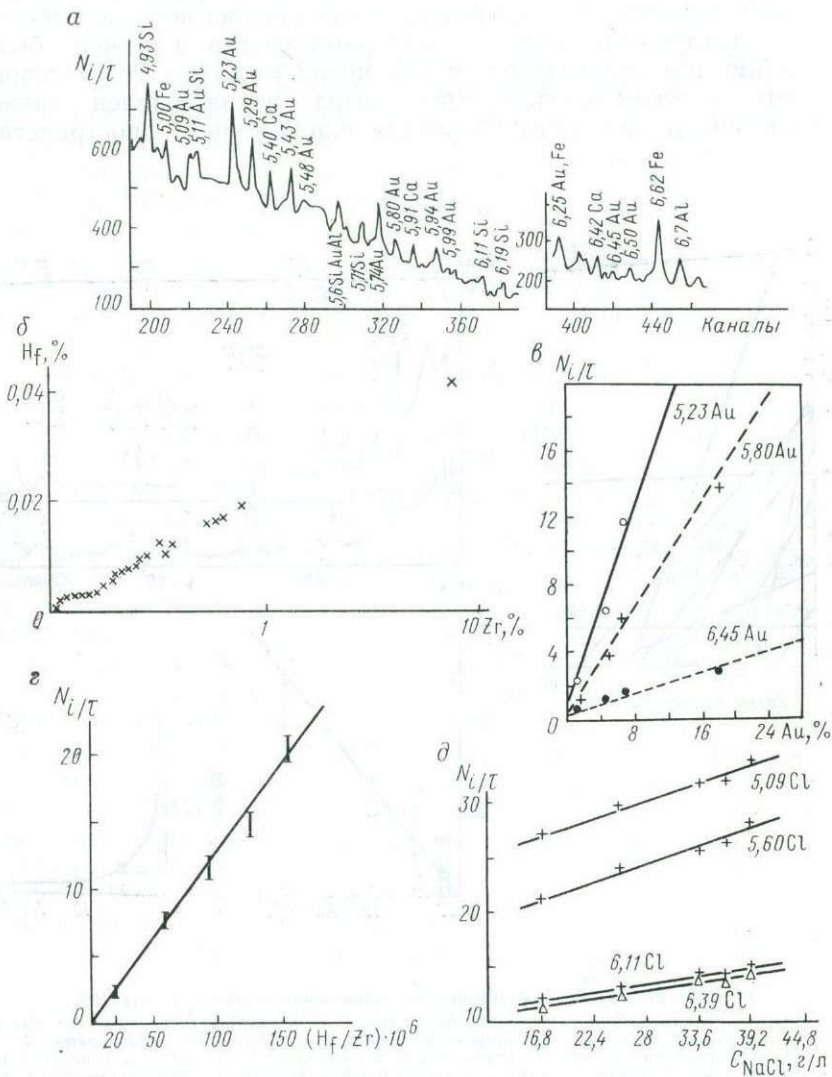


Рис. 35. Результаты нейтронного радиационного анализа золота и хлора и нейтронного активационного анализа гафния.

a — жесткая часть спектра захватного гамма-излучения образца, содержащего 0,505 г золота [84]; *б* — зависимость содержания гафния от содержания циркония в современной прибрежно-морской россыпи юго-восточной части Балтийского моря (лабораторный гамма-активационный анализ) [48]; *в* — связь количества импульсов в фотопиках разных энергий с содержанием золота в образце [84]; *г* — связь наведенной гамма-активности (за 40 с) с изменением отношения гафния и циркония [119]; *д* — связь количества импульсов в фотопиках разных энергий с соленостью морской воды [120]

сдерживалось из-за отсутствия достаточно эффективных СБД с хорошим энергетическим разрешением, особенно при высоких энергиях. Значительный прогресс в этой области стал возможен благодаря применению полупроводниковых (ППД) германий-литиевых, кремниевых и других типов детекторов.

На рис. 35 [84] приведен спектр захватного гамма-излучения образца, имитирующего золотоносную руду, содержащую основные породообразующие элементы — 20 г окиси кремния, по 1 г окиси железа, алюминия и карбоната кальция вместе с 0,505 г золотой фольги. Идентификация кремния, железа, алюминия, кальция и золота не вызывает затруднений. Несмотря на значительную разницу в содержаниях элементов, гамма-спектральные характеристики, полученные при облучении образца потоком 10^6 (т. нейтр. см^{-2})/с при использовании германий-литиевого детектора объемом 50 см^3 , оказались почти одинаковыми.

При исследованиях спектров захватного гамма-излучения золоторудных пород одного из месторождений кроме золота с точностью, соответствующей данным химического анализа, были определены кремний, барий, мышьяк, стронций, марганец, сурьма и серебро.

Для высоких содержаний золота (1—20% в смеси) отмечается практически линейная зависимость суммы импульсов в фотопике полного поглощения 6,45 МэВ, полупарном 5,80 МэВ, парном 5,23 МэВ (рис. 35, в). Дополнительный учет влияния солености морской воды может быть проведен по захватному гамма-излучению хлора. Здесь устанавливается также почти линейная зависимость суммы импульсов в фотопике полного поглощения 6,11 МэВ, полупарном пике 5,6 МэВ и в парных пиках 5,09 и 6,39 МэВ (рис. 35, д). Указанная зависимость отмечается в интервале содержаний 15—40 г NaCl на 1 л воды.

Проведение нейтронной активации и измерение интенсивности наведенного гамма-излучения гафния с целью количественного определения титана и циркония основано на тесной корреляционной связи титана, циркония и гафния, изученной на примере современных россыпей юго-восточной части Балтийского моря. Содержание титана и циркония изучалось по корреляционным связям минералов россыпей Вислинской и Куршской кос и района Юрмалциемс. Полученные коэффициенты корреляции приведены в табл. 19 и 20.

Зависимость содержания гафния от содержания циркония иллюстрируется рис. 35, б. Содержание указанных элементов определено лабораторными гамма-активационными методами.

Универсальность и устойчивость связей Zr—Hf достаточно подробно освещена в литературе [63, 70]. Естественно, что в кислых, щелочных и ультраосновных породах степень контрастности этих связей различна. Так, по данным наших исследований [48], общее отношение Zr/Hf может меняться на порядок

для россыпей Прибалтики (современные морские) и Украины (консолидированные россыпи).

Использование нейтронной активации для поисков циркониевых месторождений затруднено тем, что при этом не образуются изотопы-индикаторы, имеющие период полураспада несколько секунд. Эти изотопы наиболее удобно применять для непрерывного активационного анализа. Методические решения, основанные на применении непрерывного подводного активационного анализа, дадут возможность вовлекать в разведку любые локальные участки, представляющие промышленный интерес.

Измерения, проведенные Ж. Л. Веротом (J. L. Verot) [119], показали, что определение гафния по пику наведенного гамма-излучения 0,161 МэВ в серии из пяти независимых замеров каждого образца, содержащего 20, 60, 94, 126 и 155·10⁻⁴% Hf (см. рис. 35, з), свидетельствуют о практически линейной зависимости отношения содержаний Hf/Zr от интенсивности наведенной гамма-активности.

Изомеры-индикаторы ^{178m}Hf и ^{179m}Hf имеют периоды полураспада, равные соответственно 4,8 и 19 с. При переходе в нормальное энергетическое состояние ^{178m}Hf испускает пять каскадных гамма-квантов, из которых наибольшее значение для анализа имеют гамма-кванты с энергией E_γ , равной 0,214; 0,326 и 0,427 МэВ; ^{179m}Hf — три каскадных гамма-кванта, из которых в данном случае имеют значение гамма-кванты с энергией E_γ , равной 0,161 и 0,217 МэВ. Выход гамма-квантов всех указанных энергий близок к 100%. Возникающие под действием нейтронного излучения остальные радиоактивные изотопы сильно отличаются от ^{178m}Hf и ^{179m}Hf по энергиям гамма-излучения и периодам полураспада.

Помеху полезному сигналу создает гамма-излучение неупругого рассеяния быстрых нейтронов и радиационного захвата тепловых нейтронов, которое исчезает практически через несколько миллисекунд после облучения. Выбор времени «охлаждения» $\tau_{охл}$ должен обеспечивать практическое исключение влияния фона от короткоживущих изотопов, а измерения в достаточно узком временном интервале (равном, например, периоду полураспада ^{178m}Hf) должны обеспечить достаточно малый вклад долгоживущих активностей. Выбор временного режима облучений и измерений реализуется непрерывным протягиванием источника и жестко связанных с ним одного или нескольких детекторов с помощью буксирующего устройства любого типа. Упомянутая временная задержка после облучения $\tau_{охл}$ достигается путем выбора соответствующего оптимального расстояния между источником и первым основным детектором, называемым размером зонда L . При скорости перемещения $v=10$ км/ч (около 5,5 узла) размер зонда довольно мал. Та-

кой размер исключает прямую регистрацию излучения источника.

Для определения фона необлученных пород, выяснения зависимости наведенной активности от времени и для других целей можно использовать дополнительные датчики. Положение датчиков относительно источника и расстояние между ними выбираются с учетом приведенных выше соображений.

При проведении нейтронно-активационных исследований в морской воде под действием тепловых нейтронов в результате реакции $^{37}\text{Cl} (n, \gamma) ^{38m}\text{Cl}$ возникает изомер ^{38m}Cl с периодом полураспада 0,7 с. Испускаемые им гамма-кванты с энергией 1,6 и 2,15 МэВ создают дополнительный мешающий фон. Для его надежного исключения достаточно проводить измерения через 5—7 периодов полураспада ^{38m}Cl после облучения, что составляет примерно 5 с. Вклад гамма-активности с энергией 0,66 МэВ исключается путем применения одного из дополнительных датчиков в указанном энергетическом интервале. Этот датчик работает в режиме вычитания с основным.

Повышение точности при измерениях в море достигается не только указанным выше выбором временного интервала измерений, но и экранированием измерительной схемы сверху. Последнее осуществляется, например, экранированием источника пресной водой, парафином, графитом и другими чистыми замедлителями и экранированием детектора сверху достаточным защитным слоем свинца.

Другое методическое решение может предусматривать проведение исследований в режиме активации по точкам. Для этого источник нейтронов помещается в исследуемую точку на определенное время, необходимое для того, чтобы активность исследуемого изомера ^{179m}Ni достигла активности насыщения. Затем буксирующее устройство перемещает детектор в точку активации, а источник в это время перемещается для активации новой точки дна. Время упомянутого перемещения определяется временем $\tau_{\text{охл}}$, длиной зонда L и скоростью буксирования v .

В лабораторных условиях для определения содержания титана, циркония и гафния пробы облучаются в пучке тормозного излучения стандартного бетатрона на 25 МэВ. По интенсивности наведенной активности гамма-излучения определяется содержание искомого элемента [48]. В зависимости от содержания определяется навеска пробы (30—100 г), максимальная энергия тормозного излучения бетатрона (15, 17 и 25 МэВ), время облучения проб (2, 10, 20 мин), время охлаждения облученных проб (20 с, 100 мин, 24 ч), время измерения наведенной активности (1 мин, 5 мин).

Определение содержания титана производится по интенсивности аннигиляционного гамма-излучения изотопа титана ^{45}Ti или по интенсивности гамма-излучения изотопа скандия ^{47}Sc .

Содержание циркония определяется по интенсивности гамма-излучения изомера циркония ^{89m}Zr или ^{89}Zr ; содержание гафния — по интенсивности гамма-излучения изомера гафния ^{179m}Hf . Тарирование измерений производится с помощью эталонных проб с известным содержанием искоемых элементов, которые облучаются совместно с определяемыми. Для россыпей юго-востока Балтийского моря получены содержания: титана — 0,1—3,61%, циркония 0,03—3,30%, гафния — 0,003—0,078%.

Поскольку монацит и циркон являются природными гамма-излучателями, а определение титана, циркония и гафния в навесках 30—100 г достаточно надежно и эффективно проводится гамма-активационным методом, этот комплекс исследований может быть успешно применен для исследования современных прибрежно-морских титан-циркониевых россыпей.

Возможности гаммаметрии при поисках фосфоритов, железомарганцевых конкреций и перспективы применения активационного элементного анализа пород морского дна

Наряду с нефтью, газом и минералами прибрежно-морских россыпей значительный интерес представляет изучение фосфоритового сырья и железомарганцевых конкреций глубоководных океанических зон. Современное образование фосфоритовых и железомарганцевых конкреций является одним из существенных аспектов изучения минерально-сырьевой базы Мирового океана. Несомненный интерес представляет исследование возможностей прикладной ядерной физики для изучения элементного состава и динамики образования этих осадков. Усилия ученых многих стран направлены на то, чтобы 70-е годы ознаменовались началом промышленной добычи железомарганцевых конкреций, фосфоритов и металлов из высокоминерализованных рассолов и илов морского дна.

Гамма-спектрометрия фосфорсодержащих осадков шельфа

Фосфорсодержащие породы зачастую привлекают внимание исследователей своей повышенной ураноносностью. Содержание урана в фосфоритах иногда может достигать промышленных значений, но извлечение его из пород фосфоритоносных формаций производится попутно при химической переработке фосфоритов. Как правило, содержание урана в них не превышает нескольких сотых долей процента.

Сингенетичность урана и вмещающих пород фосфоритоносных формаций обычно не вызывает сомнений. По данным Г. Я. Островской [49], 0,6% ураноносных фосфоритов связано с континентальными фациями. Основные концентраторы урана — морские фосфориты — имеют весьма широкий стратиграфический диапазон, охватывая кембрийские, пермские, верхнеюрские, меловые, палеогеновые и неогеновые образования. Известны также многочисленные уран-фосфатные ассоциации, приуроченные к костным остаткам рыб, птиц и крупных позвоночных животных. Как показано в литературе [8, 9, 57, 68 и др.], повышенные содержания урана могут быть обнаружены в фосфатных отложениях практически повсеместно. Но лишь в определенных

фосфоритоносных формациях прослеживается четкая связь с ураноносностью.

Представляется весьма перспективным использовать повышенную ураноносность фосфоритов при поисках их на шельфе и подводном склоне Тихого, Индийского и Атлантического океанов, где уже выявлены их подводные залежи.

Мировое потребление фосфоритов в настоящее время находится на уровне около 100 млн. т в год. К 2000 г. ожидается утроение этой цифры. Известные на суше запасы фосфоритов составляют многие десятки миллиардов тонн. Распространение же их известно в нескольких местах — Северная Африка, Ближний Восток, США, Бразилия, СССР, некоторые острова Индийского и Тихого океанов. Поэтому многие страны вынуждены импортировать фосфорное сырье или исследовать возможности добычи его в пределах акваторий, где может проводиться добыча и переработка сырья различными международными организациями.

Известно четыре формы нахождения фосфоритов в море:

1) желваковая (конкреционная) форма. Сюда входят корки, плиты, потеки, замещения органических остатков и остаточные скопления более древних, переотложенных стяжений;

2) фосфатные пески — зернистые фосфатные осадки преимущественно апатитового состава, фосфатные оолиты, фосфатизированные органические и минеральные частицы, обломки фосфоритов соответствующей размерности и т. п.;

3) фосфатные илы — локально расположенные на мелководьях близ берегов пелитовая и алевро-пелитовая примеси фосфатных частиц в терригенных илах (иногда карбонатных);

4) глубоководные фосфаты — в виде замещенных фосфатами карбонатных осадков и пород, образующих зачастую сплошные массы.

Несмотря на худшее качество руды (не выше 25—29% P_2O_5) морских залежей, разработка их имеет ряд преимуществ перед разработкой наземных. Основное преимущество — отсутствие вскрышной толщи. Имеющиеся проекты технологии добычи и добычных устройств предусматривают и значительную глубину воды, и необходимость дополнительного обогащения. Существующие технологические схемы переработки фосфоритов на суперфосфат требуют содержания P_2O_5 не менее 31%.

Две площади — Сорокамильная банка у Сан Диего (Калифорния — желваковые фосфориты) и в заливе Санто Доминго (также у берегов Калифорнии — фосфатные пески) — разведаны и подготовлены к разработке. Усиленно готовятся к подводной добыче фосфоритов в Австралии, Японии, Перу, Чили, Индии.

Установленная для отдельных типов фосфоритов их связь с естественной радиоактивностью [46] позволила успешно применить непрерывный радиометрический метод определения P_2O_5 в фосфоритных рудах. Применение этого метода на горно-хими-

чешских комбинатах позволяет получать за 30 мин измерения среднеквадратичную ошибку непрерывного контроля не хуже 0,8% P_2O_5 .

Изучение современных фосфоритов на континентальном шельфе Перу [10, 118] показало их приуроченность к нижней и верхней границам слоя минимального содержания кислорода. Отмечаются изменение содержания P_2O_5 от 17 до 35%, вариации глубин — от 120 до 450 м и дифференциация в содержаниях урана ($6,7-168 \cdot 10^{-4}\%$) и тория ($1,8-6,7 \cdot 10^{-4}\%$). Отношение $^{234}U/^{238}U$ изменяется от 1,06 до 1,15, $^{230}Th/^{234}U$ — от 0,021 до 0,62.

Т а б л и ц а 27

Радиоактивность фосфоритов [105]

Номер образца	Содержание P_2O_5 , %	Интенсивность, имп/с	
		на судне	в лаборатории
Породы			
120	0,37	16	156
136-Ф	19,84	350	15502*
139-И	—	25	—
139-Ф	25,26	—	5942
148	20,14	230	9604
151	0,40	25	178
152-Ф	13,56	—	—
156	16,59	240	8482*
157	11,16	—	5829
234	7,90	180	6021
Осадки			
111	0,34	17	—
112	0,28	16	115
113	0,23	16	—
114	0,25	17	—
116	0,16	18	—
117	0,13	19	—
119	0,11	20	—
120	0,12	22	178
121	0,23	23	245
125	0,11	21	—
126	0,12	—	239
129	1,58	—	339
133	3,04	32	505
134	1,80	33	—
135	0,21	—	157
137	0,30	—	161
151	0,34	24	299
155	0,50	—	223*

* Спектрограмма образца приведена на рис. 36.

Определение возраста (от конца плейстоцена и до настоящего времени) проведено урановым (^{234}U) и иониевым (^{230}Th) методами.

В результате измерений концентраций урана в 40 образцах морских фосфоритов получены значения от 0,0006 до 0,052% [91].

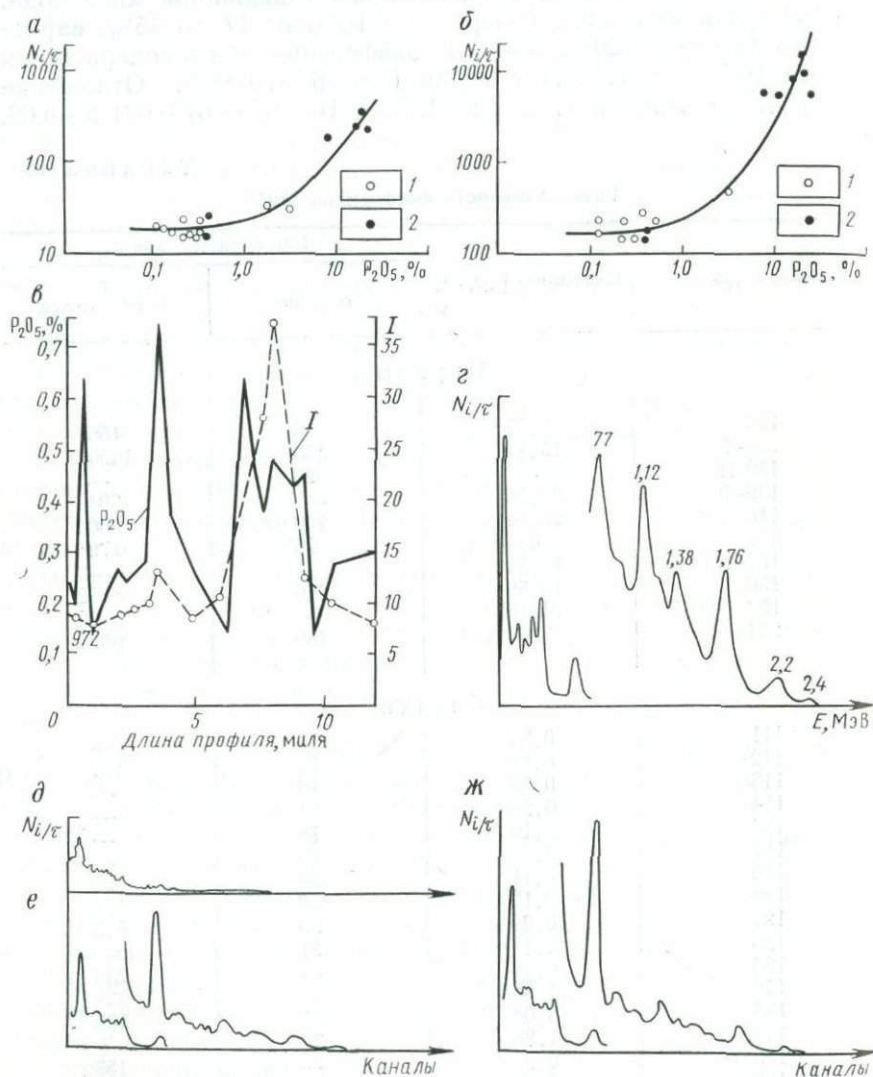


Рис. 36. Применение гаммаматрии для исследования фосфорсодержащих морских осадков [105].

Зависимость гамма-излучения от содержания P_2O_5 в осадках (1) и породах (2); измерения: а — судовые, б — лабораторные; в — сопоставление интенсивности гамма-излучения I (в отн. ед.) и содержания P_2O_5 по станциям; г — спектрограмма эталона; спектрограммы образцов: д — 155, е — 156, ж — 136

Натурные исследования у северо-западного побережья Африки между Агадиром и Рабатом [105] дали аналогичные результаты. Работы выполнялись по станциям морским сцинтилляционным радиометром (аналог МОРСа), которым было отработано три профиля в 1968 и 10 профилей в 1969 гг. Гамма-спектрометрия проведена с использованием 100-канального анализатора. Сопоставление радиоактивности и содержания двуокиси фосфора приведено в табл. 27. Эти данные для судовых (рис. 36, а) и лабораторных (рис. 36, б) определений представлены порознь. В работе использовался подводный алюминиевый контейнер с толщиной стенки 20 мм. СБД выполнен на кристалле NaI(Tl) диаметром 50 мм. Спектры эталона показаны на рис. 36, г, спектры образцов — на рис. 36, д—ж. Сопоставление радиометрических (в имп/с) и химических ($\% \text{P}_2\text{O}_5$) измерений приводятся на рис. 36, в.

Анализ полученных данных позволяет авторам выделять содержания P_2O_5 от 2 до 30% как радиометрически отображаемые в силу увеличения концентрации урана. Проведенные определения дали для образца 136—0,06%, 139—0,004% и 148—0,014% урана. Все эти образцы характеризуются содержанием P_2O_5 порядка 20%. Спектрометрия естественного гамма-излучения образца 136 (19,84% P_2O_5 и 0,06% урана, см. рис. 36, ж) и образца 156 (16,59% P_2O_5 , содержание урана аналогично образцу 136, см. рис. 36, е) резко отличны от спектрограммы образца 155 (0,5% P_2O_5 , см. рис. 36, д).

Сопоставление уровня интегрального счета (имп/с) и содержания P_2O_5 также показывают прямую зависимость естественной радиоактивности от содержания P_2O_5 .

Исследование железомарганцевых конкреций, высокоминерализованных рассолов и илов

Комплексные образования железа и марганца с никелем, медью, кобальтом, молибденом и цинком, известные как глубоководные месторождения железомарганцевых конкреций, в последнее время стали объектом разносторонних научных и прикладных исследований. Отмечается их приуроченность к районам слабой седиментации и развития вод, насыщенных кислородом. Предполагается, что на дне океанов находится около 1500 млрд. т марганцевых конкреций, а ежегодный прирост их оценивается в 10 млн. т.

Имеющиеся мировые запасы марганцевых руд (на начало 1972 г.) оценивались в 896 000 тыс. т, добыча составляла 11 047,5 тыс. т в год. Поля развития железомарганцевых конкреций обнаружены в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах. Отмечается, что тихоокеанские конкреции богаче марганцем, медью и никелем, но беднее железом. Содержание марганца в осадках Атлантического океана заметно выше, чем в

осадках Балтийского, Черного и Средиземного морей, но ниже, чем в Тихом океане.

Наиболее чистая руда с содержанием марганца до 40% была обнаружена в пятисантиметровом слое осадков при драгировании рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта. Определение возраста, проведенное с помощью радиометрии, показало, что скорость накопления этой руды в 20 раз выше, чем других ранее известных донных стяжений. Возможно, что руда образовалась гидротермальным путем за последние несколько тысяч лет [110].

Исследование содержания ^{230}Th в тихоокеанских и атлантических конкрециях (по альфа-активности) показало неравномерность роста (со стороны грунта и со стороны воды) тихоокеанских и общую неравномерность роста атлантических конкреций. Интенсивность роста конкреций с накоплением железа и марганца связывается с активной вулканической деятельностью. Периодам спада вулканической деятельности соответствует приостановка роста конкреций.

Рентгенорадиометрия, проведенная в 1973 г., позволила определить содержание марганца, железа, кобальта, никеля, меди и цинка непосредственно на борту судна с ошибками, не превышающими 5% для кобальта и 3% для остальных элементов. Месячная производительность составила около 350 образцов. По данным 190 анализов определены зональные вариации в содержаниях и средние значения: железа — 6,7; марганца — 23,3; кобальта — 0,23; никеля — 1,16; меди — 0,94 и цинка 0,1% при среднем суммарном содержании четырех последних элементов 2,48%. По всем анализам отмечается линейная зависимость содержаний марганца и никеля [86].

Химия изотопов урана и тория в железомарганцевых конкрециях из Южного океана подробно рассмотрена в [113].

По 48 измерениям содержания урана в морских железомарганцевых конкрециях получено среднее значение $9 \cdot 10^{-4}\%$ при изменениях от 4 до $13 \cdot 10^{-4}\%$ (наиболее часто встречаемые значения от 6 до $10 \cdot 10^{-4}\%$). Эти данные неплохо коррелируются с полученными колориметрическим и люминесцентным анализами. Содержания тория дали более широкий интервал значений — от 3 до $150 \cdot 10^{-4}\%$. Аномально повышенные значения ($124 \cdot 10^{-4}\%$) встречены в северной части Тихого океана [92]. Наряду с географической отмечается вертикальная дифференциация в содержании урана и тория. Возможно, что при прочих равных условиях естественная радиоактивность атлантических конкреций будет выше тихоокеанских (рис. 37), а конкреции Индийского и Антарктического бассейнов будут иметь средние значения. Отношение уран/торий в конкрециях изменяется от 0,04 до 4 при среднем около 0,2, что находит объяснение в химической дифференциации уранового и ториевого ионов в морской воде.

Исследование железомарганцевых конкреций может проводиться и с помощью захватного гамма-излучения. Количественное определение содержания марганца в морских конкрециях может осуществляться по спектрометрии захватного гамма-излучения в интервале энергий 4,51—7,24 МэВ. Определение может быть выполнено с использованием нейтронного потока атомного реактора или изотопного источника нейтронов — ^{252}Cf , массой около 130 мкг ($3 \cdot 10^8$ нейтр./с). Как показано в табл. 28, определенные обоими методами содержания марганца имеют близкие значения.

Возможно также проведение количественных определений никеля по фотопикам 7,98 и 8,49 МэВ, меди — 6,89 МэВ, железа 6,62; 7,13 и 7,64 МэВ и золота — 5,23; 5,80 и 6,45 МэВ. Влияние хлора может быть учтено по фотопикам 5,09; 5,60; 6,11 и 6,39 МэВ (см. рис. 35, д). Для всех указанных элементов наблюдается

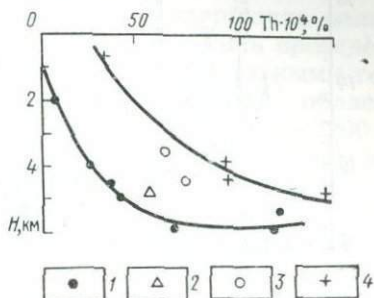


Рис. 37. Зависимость содержания тория в марганцевых конкрециях от глубины [92] океанов:
1 — Тихого, 2 — Антарктического, 3 — Индийского, 4 — Атлантического

дается линейная зависимость. Несколько иной вид зависимости отмечается для вольфрама. Наблюдается линейная зависимость в области малых содержаний (менее 2—3%), но при значениях, больших 8—10%, фиксируется насыщение по фотопикам 5,17; 5,68 и 6,19 МэВ.

Таблица 28

Определение содержания марганца в морских конкрециях с использованием калифорниевого источника и реактора [121]

Исследуемая энергия, МэВ	Интенсивность от MnO_2 , имп		Интенсивность от конкреции, имп		Содержание марганца в конкрециях, %	
	Реактор	^{252}Cf	Реактор	^{252}Cf	Реактор	^{252}Cf
6,04	3821	5215	832	1485	40,7	38,2
6,14	2723	3581	569	1157	40,1	43,0
6,22	4136	4673	887	1475	40,7	42,0
					Среднее: 40,5	41,06

Применение изотопного источника нейтронов — ^{252}Cf позволило (рис. 38, а) провести спектрометрию конкреций в морской

воде, исследовать спектры захватного гамма-излучения (рис. 38, б) истолченной пробы марганцевой конкреции и чистой двуокиси марганца (рис. 38, в) [121].

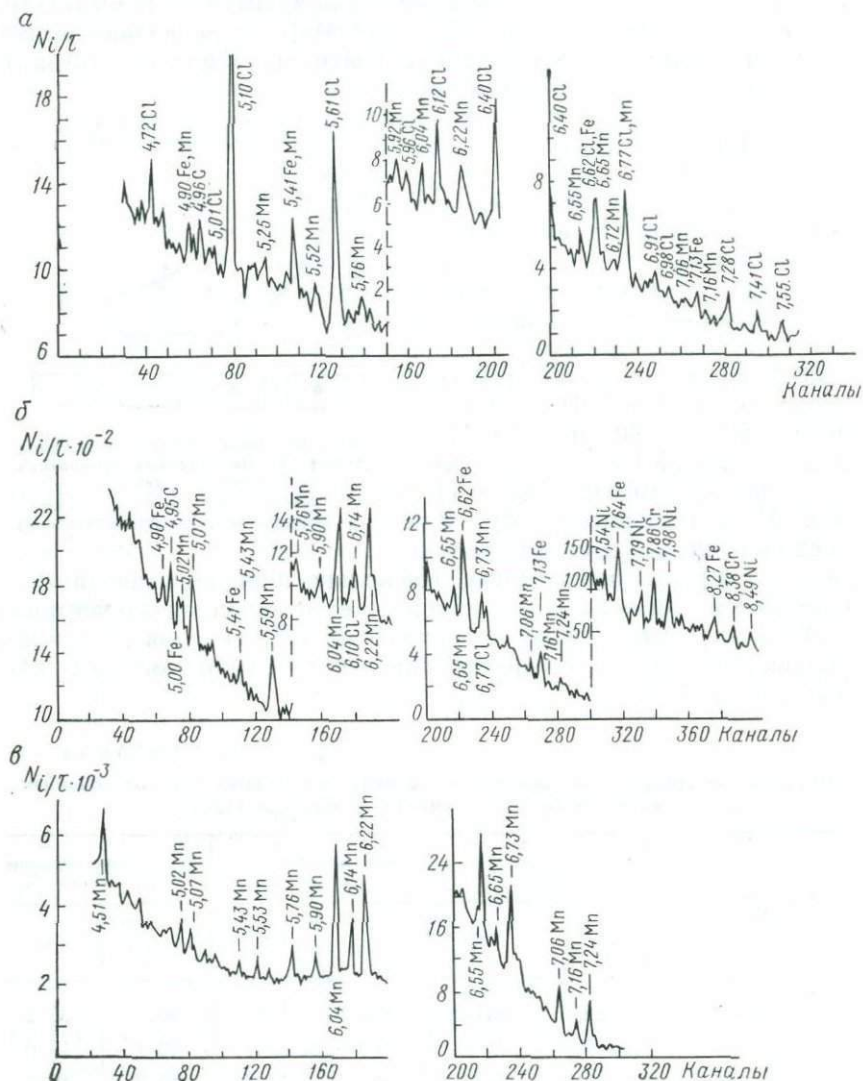


Рис. 38. Спектры захватного гамма-излучения марганцевой конкреции в морской воде (а), раздробленной марганцевой конкреции (б), чистой двуокиси марганца (в) с использованием калифорниевых источников нейтронов [121]

Хорошее разрешение фотопиков марганца и железа позволяет считать спектрометрию захватного гамма-излучения весьма

перспективным методом при поисках и разработке подводных месторождений железомарганцевых конкреций.

Изучение железомарганцевых конкреций *in situ* целесообразно проводить в три стадии: а) поисково-разведочная — выявление и оконтуривание залежей; б) оценочная — установление их промышленной ценности; в) детальной разведки — обоснование системы и способов разработки конкреций.

Выявление, оконтуривание и определение содержания полезных компонент, как было показано выше, может быть проведено с использованием ядерно-физических методов. Детальными геофизическими и батиметрическими исследованиями в области центрального сброса Красного моря на глубинах 1900—2200 м зафиксировано несколько впадин с большим количеством металлоносного ила и горячих минерализованных рассолов с необычайно высокими содержаниями марганца, цинка, свинца, меди, серебра и золота. Их расположение в осевой зоне рифта, подвергшейся интенсивным разрывным нарушениям, и высокая температура (60°С) свидетельствуют об интенсивном гидротермальном воздействии центральной рифтовой зоны [58].

Слой горячих минерализованных рассолов, мощностью до 200 м, содержит те же металлы, которые входят в состав современных донных отложений (марганец, железо, цинк, свинец, медь, серебро и золото), в концентрациях, в 1000—50 000 раз превышающих их концентрации в обычной морской воде (см. табл. 1). Отношение содержания серебра и золота дает величину порядка 80, что близко к средним данным порядка 100 для пород сульфидных формаций [95].

Таблица 29

Состав рассолов Красного моря [95]

Элементы	Содержание, г/кг	
	Впадина Атлантис-11	Впадина Дискавери
Хлор	156,03	155,3
Бром	0,128	0,119
Кремний	0,028	0,0035
Натрий	92,6	93,05
Калий	1,87	2,14
Кальций	5,15	5,12
Магний	0,764	0,810
Стронций	0,048	0,046
Железо	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Марганец	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
Цинк	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$
Золото	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Кобальт	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Никель	—	$3,4 \cdot 10^{-4}$
Свинец	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
SO ₄	0,840	0,695

В настоящее время известно около 17 впадин. Химический состав рассолов двух крупнейших впадин Красного моря (Атлантис-II и Дискавери) приводится в табл. 29.

Изучение генетической связи подводного вулканизма и процессов формирования богатых руд, ограниченных размерами небольшой впадины морского дна, показывает, что таким путем могут образовываться месторождения с высокими содержаниями меди (3,2%) и золота (3 г/т), как это показано на примере месторождения Акарсен в северо-восточной Турции [90].

При мощности металлоносных илов несколько десятков метров и высокоминерализованных рассолов несколько сотен метров такие впадины являются удобным полигоном для апробации различных ядерно-геофизических способов определения элементного состава осадков *in situ*. Вертикальное зондирование рассолов может выполняться с судна с использованием гаммаметрий естественного, наведенного и захватного излучений. Консолидированные осадки мощностью 10-30 м могут исследоваться автономными либо пассивными системами, снабженными пенетрационными установками для заглубления исследующих устройств в грунт. Здесь также целесообразно проведение полного комплекса гаммаметрии.

Перспективы применения изотопных и генераторных источников излучений для элементного анализа пород морского дна

Возникновение гамма-излучения в современных морских осадках и породах морского дна может происходить в результате естественного распада радиоактивных элементов и при образовании искусственных радиоактивных изотопов из-за воздействия быстрых, замедленных и тепловых нейтронов (неупругое рассеяние нейтронов в процессе замедления и гамма-излучение радиационного захвата), взаимодействия осадков с гамма-излучением более высоких энергий и т. д. В результате образуется сложное энергетическое и временное распределение гамма-излучения, анализ которого проводится путем разложения его на ряд более простых составляющих.

В настоящее время накоплен и в значительной мере систематизирован материал по естественному гамма-излучению, а также по спектрометрии гамма-излучения нейтронно-активационного, нейтронно-радиационного и гамма-активационного способов анализа. Исследуются оптимальные условия получения нейтронных потоков в реакторах и от изотопных и управляемых источников. Изучаются возможности создания и использования генераторов гамма-квантов и линейных ускорителей электронов. Однако количественного отображения состава пород и осадков в исследуемом гамма-поле пока не найдено, хотя в условиях

проведения исследований в море создание конкретных методик дистанционного определения наиболее интересных элементов является задачей, решаемой несколько проще, чем в скважинных условиях.

Дифференциация основных породообразующих элементов (кислорода, кремния, алюминия, железа и магния) может быть проведена путем нейтронно-активационного анализа (НАА). Не лишне отметить, что 71% земной поверхности перекрыт водами морей и океанов, а данные о составах пород и отложений, скрытых под водой, основаны на результатах анализов ограниченного числа образцов и керн, добытого с морских и океанических глубин. Парадоксально, но сейчас степень изученности поверхности Луны не ниже, а, по-видимому, даже выше, чем степень изученности морского дна. Если исследования морского дна будут продолжаться более интенсивно, то использование технических средств и методов, разработанных для изучения Луны и планет, найдут себе достойное место и при подводных геологических, геофизических и геохимических исследованиях.

При картировании состава пород морского дна возникает ряд специфических проблем. Основная из них — оптимизация аппаратуры, методики и техники проведения глубоководных исследований, связанных с получением информации о физических свойствах и составе морских осадков и пород в условиях их естественного залегания. В настоящее время количественный элементный анализ отложений морского дна проводится по образцам, добытым со дна моря сначала в судовых, а потом в стационарных аналитических лабораториях. Это связано с большими затратами времени для получения данных о локальных участках. Поэтому не представляется возможным проводить достоверную интерполяцию состава и физических свойств донных образований.

Компактная система для 14 МэВ нейтронного активационного анализа (НАА) была применена для изучения космических объектов по дифференциации типов пород в зависимости от содержания в них кислорода, кремния, алюминия, железа и магния. С этой аппаратурой был проведен НАА морских пород и отложений для изучения распределения указанных элементов в осадках дна Мексиканского залива по отобраным образцам [107]. Облучение проводилось ускорителем Coscroft-Walton мощностью 150 кВт потоком $4-5 \cdot 10^8$ (нейтр./см²)/с. Нейтронный поток по реакции ${}^3\text{H}_1({}^2\text{H}_1, n){}^3\text{He}_2$ создавался бомбардировкой дейтерием тритиево-циркониевой мишени диаметром 2,54 см. Проведенные лабораторные исследования показали, с какими основными проблемами придется встретиться при проведении НАА морского дна в естественных условиях.

Нейтронный активационный анализ на дне моря может проводиться при строгом учете постоянства потока нейтронов и геометрии облучения и измерения. Самым тщательным образом

должна быть исследована также термализация быстрых нейтронов. Известно, что интерферирующие реакции на быстрых и тепловых нейтронах могут дать спектр гамма-излучения, практически не поддающийся обработке.

Изучение эффекта термализации быстрых нейтронов на высушенных образцах морских осадков было проведено двумя сериями активации с использованием парафина в качестве замедлителя нейтронов. В первой серии облучение длилось 5 мин, во второй — 10 мин. По полученным гамма-спектрам не видно какой-либо значительной интерференции, несмотря на некоторую термализацию быстрых нейтронов. Реакции и продуцированное ими гамма-излучение показаны на табл. 30 и 31.

Т а б л и ц а 30

Ядерные реакции на быстрых нейтронах [107]

Элементы	Реакция	$T_{1/2}$	E , МэВ	Интерферирующие реакции
Алюминий	$^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$	9,5 мин	0,84; 1,01	$^{30}\text{Si} (n, \alpha) ^{27}\text{Mg}$
	$^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$	15,0 ч	1,37; 2,75	—
Железо	$^{56}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$	2,58 ч	0,84; 1,81; 2,11	$^{59}\text{Co} (n, \alpha) ^{56}\text{Mn}$
Магний	$^{24}\text{Mg} (n, p) ^{24}\text{Na}$	15,0 ч	1,37; 2,75	$^{55}\text{Mn} (n, \gamma) ^{56}\text{Mn}$
Кремний	$^{28}\text{Si} (n, p) ^{28}\text{Al}$	2,8 мин	1,78	—
	$^{29}\text{Si} (n, p) ^{29}\text{Al}$	6,6 мин	1,28	$^{31}\text{P} (n, \alpha) ^{28}\text{Al}$
Кислород	$^{18}\text{O} (n, p) ^{18}\text{N}$	7,35 с	6,13; 7,12	$^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$ $^{19}\text{F} (n, \alpha) ^{18}\text{N}$

Т а б л и ц а 31

Ядерные реакции на тепловых нейтронах [107]

Элементы	Реакция	$T_{1/2}$	E , МэВ
Магний	$^{26}\text{Mg} (n, \gamma) ^{27}\text{Mg}$	9,5 мин	0,84; 1,01
Натрий	$^{23}\text{Na} (n, \gamma) ^{24}\text{Na}$	15 ч	1,37; 2,75
Калий	$^{41}\text{K} (n, \gamma) ^{42}\text{K}$	12,8 ч	1,52
Алюминий	$^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$	2,3 мин	1,78
Кислород	$^{18}\text{O} (n, \gamma) ^{19}\text{O}$	29 с	0,20; 1,36
Кремний	$^{30}\text{Si} (n, \gamma) ^{31}\text{Si}$	2,62 ч	1,27
Железо	$^{58}\text{Fe} (n, \gamma) ^{59}\text{Fe}$	45 сут	1,10; 1,29
Медь	$^{63}\text{Cu} (n, \gamma) ^{64}\text{Cu}$	12,9 ч	0,51 (аннигиляционные) 1,43
	$^{65}\text{Cu} (n, \gamma) ^{66}\text{Cu}$	5,1 ч	1,04

Сопоставление гамма-спектров образцов, отобранных в разных геоморфологических участках Мексиканского залива, позволило провести четкую их дифференциацию. На основании проведенных работ авторы приходят к выводу, что активационный

анализ быстрыми (14 МэВ) нейтронами может применяться для изучения вариаций в осадкообразовании и в составе осадков района. Термализация нейтронов с энергией 14 МэВ, очевидно, не является серьезной проблемой для нейтронной активации *in situ* [107].

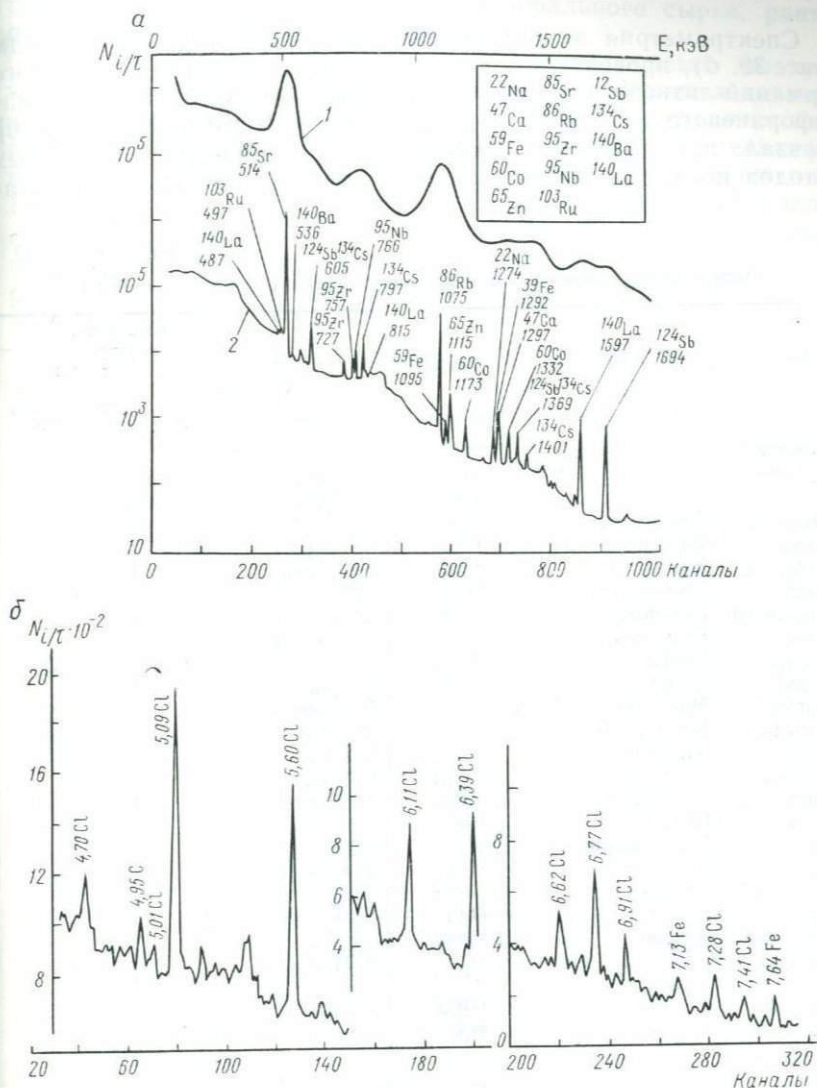


Рис. 39. Спектр наведенного (а) [по Дж. Куперу] и захватного (б) [120] гамма-излучения морской воды:

а — нейтронный поток $2 \cdot 10^{18}$ нейтр./см², детекторы NaI (Тl) 7,5 · 12 см (1) и Ge (Li) 20 см³ (2); б — калифорниевый источник, $3 \cdot 10^8$ нейтр./с, Ge (Li) детектор, 30 см³. На врезке приведены выявленные изотопы

Было также отмечено, что идеи, аппаратура и в значительной степени методика исследований с генератором нейтронов 14 МэВ позволяют проводить этот анализ *in situ* с подводных лодок или с надводных кораблей, использующих погружные портативные системы источника нейтронов и детектора излучения.

Спектрометрия захватного гамма-излучения морской воды (рис. 39, б), проведенная с использованием полупроводникового германий-литиевого детектора объемом 30 см³ и 120 мкг калифорниевого источника, дающего поток 3·10⁸ нейтр./с [120], показала принципиальную возможность применения нейтронных методов исследований в условиях морского дна. Изучение ана-

Таблица 32

Определение основных элементов в минералах с помощью ²⁵²Cf

Элементы	Минералы	Изотопы	T _{1/2}	Концентрация	
				по [73]	по данным обзора (см. примечание)
Алюминий	Все минералы	²⁸ Al	2,30 мин	□	□
Сурьма	Стибнит	¹²² Sb	2,8 сут	△	
		^{122m} Sb	4,2 мин	△	△
		⁷⁶ As	26,5 ч	□	□
Мышьяк	Арсенопирит	¹³⁹ Ba	83 мин		□
Барий	Витерит	^{60m} Co	10,5 мин	□	□
Кобальт	Кобальтин	⁶⁴ Cu	12,8 ч	□	□
Медь	Халькопирит	¹⁶⁵ Dy	2,35 ч		+
Диспрозий	Гадолинит	²⁰ F	11 с		○
Фтор	Гадолинит	¹⁹⁸ Au	64,8 ч	+	+
Золото	Кварц	^{116m} In	54 мин		×
Индий	Халькопирит	²⁷ Mg	9,5 мин	△	□
Магний	Магнезит	⁵⁶ Mn	2,58 ч	○	○
Марганец	Все минералы	²⁰⁵ Hg	5,2 мин		△
Ртуть	Киноварь	^{94m} Nb	6,3 мин		△
Ниобий	Колумбит	¹⁰¹ Mo	14,6 мин	□	○
Молибден	Молибденит	^{46m} Sc	20 с		×
Скандий	Шеелит	⁷⁷ Se	18 с	+	×
Селен	Халькопирит	¹⁰⁸ Ag	2,4 мин	+	+
Серебро	Аргентит	^{87m} Sr	2,8 ч		□
Стронций	Витерит	⁵¹ Ti	5,80 мин	+	□
Титан	Рутил	^{183m} W	5,3 с		□
Вольфрам	Шеелит	⁵² V	3,77 мин	+	+
Ванадий	Отдельные минералы				
Кадмий	—	¹¹¹ Cd	49 мин	△	
Никель	—	⁶⁵ Ni	2,5 ч	△	

Примечания. 1. Обзор: ²⁵²Cf neutron activation for remote surface analysis. Isotopes and Radiation Technology; 1972, vol. 9, № 3.

2. Содержание элементов: ×—(1±10)·10⁻⁴%, +—(10±100)·10⁻⁴%, ○—(0,01±0,1)%, □—(0,1±1,0)%, △—(1,0±10)%. —

литических параметров и энергии гамма-излучения при нейтронной активации (табл. 32) сделало возможным проведение работ по прямому определению элементов, входящих в состав современных россыпей. Наличие мощного источника нейтронов создает необходимые технические предпосылки проведения нейтронного анализа для излучения минерального сырья, растворенного в морской воде (рис. 39, а).

В последнее время при проведении нейтронных анализов элементного состава вещества при геофизических исследованиях в лабораторных и полевых условиях широкое применение находит калифорниевый (^{252}Cf) источник нейтронов. 1 г калифорния-252 генерирует поток $2,34 \cdot 10^{12}$ нейтр./с и создает дозу $1,4 \cdot 10^2$ рад/ч на расстоянии 1 м. Средняя энергия нейтронов в спектре излучения — 2,1—2,3 МэВ [111]. Значительный период полураспада (85,5 года по спонтанному и 2,65 года по альфа-распаду) обусловили его применение при длительных экспериментах.

В одном из обзоров, посвященных применению НАА, показано, что использование 1,8 мг калифорниевого источника позволило оценить возможность определения с этой аппаратурой 16 элементов (см. табл. 32). Аппаратура состояла из многоканального анализатора с полупроводниковым германий-литиевым детектором объемом 50 см^3 . Облучение в условиях, максимально приближенных к условиям морского дна, имело длительность 120 с, выдержку 30÷60 с, время счета 120 с (рис. 40, а—в).

В процессе подготовки аппаратуры к натурным исследованиям в аналогичных условиях были проведены измерения на образце дунита. Источник располагался по центру образца (цилиндр диаметром 58 см, высотой 25 см). Облучение проводилось в течение 120 с. Затем после 30—40 с выдержки были проведены измерения в течение 200 с.

В прилагаемом на рис. 40, в спектре гамма-излучения образца дунита видны линии серебра ^{108}Ag (434, 511 и 633 КэВ), ^{110}Ag (658 КэВ), алюминия, магния, марганца, ванадия и хлора. Содержание серебра в образце 0,05%, марганца — 0,1%.

Аналогичные исследования по 22 элементам приведены в работе [73]. Здесь применялся источник калифорния-252 массой 1 мг, дающий поток тепловых нейтронов 10^7 нейтр.·см²/с с полупроводниковым германий-литиевым детектором объемом 80 см^3 . Исследования проводились на образцах массой 5 кг. Данные сведены в табл. 32. Так же как и в предыдущей работе, отмечается возможность быстрого элементного определения *in situ* в минералах, покрытых морскими и пресными водами. Элементные определения в минералах проведены с ошибкой от ± 3 до $\pm 15\%$.

В течение нескольких лет (1969—1972 гг.) проводились полевые эксперименты с применением нейтронно-активационного

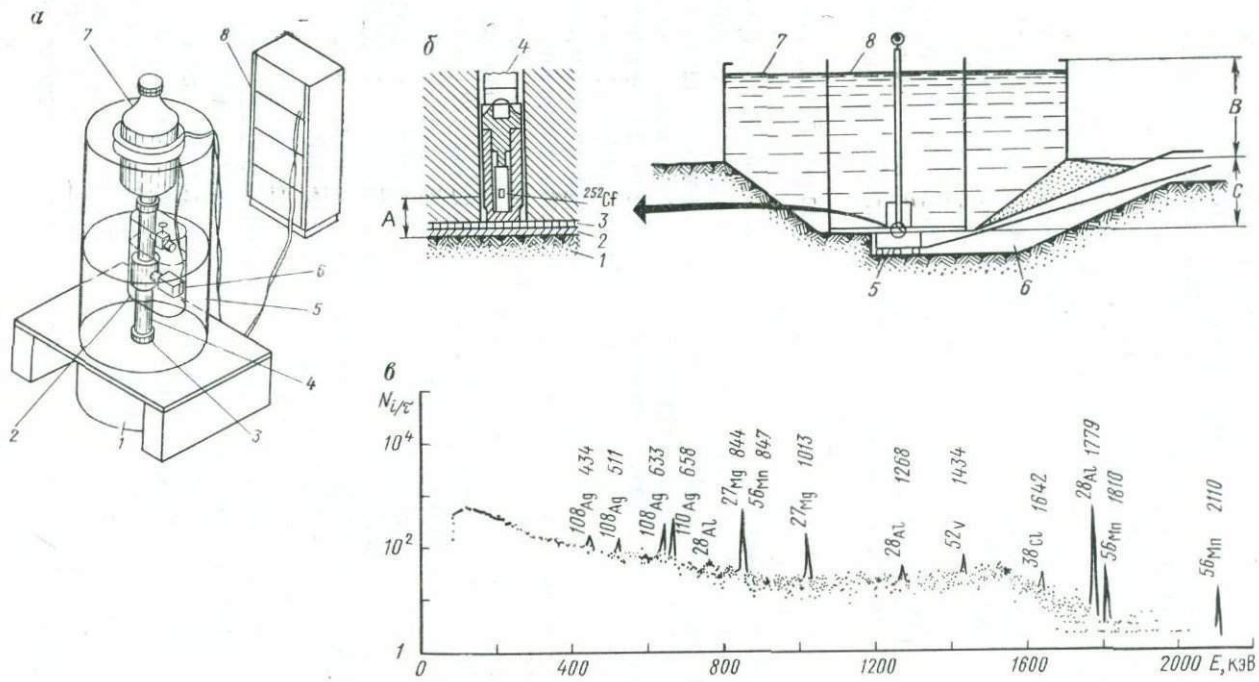


Рис. 40. Лабораторный макет установки для подводной активации.

a — подводный комплекс и надводный анализатор: 1 — исследуемый образец, 2 — защитный чехол, 3 — направляющее кольцо, 4 — ППД, 5 — плексигласовый экран, 6 — предусилитель, 7 — сосуд Дьюара, 8 — анализатор; *б* — имитация подводных условий: 1 — образец, 2 — алюминий, 3 — пластмасса, 4 — привод калифорнийского источника, 5 — тележка, 6 — туннель, 7 — внешний бак, 8 — внутренний бак; А — линейный размер для данной геометрии измерений; *в* — спектр наведенного гамма-излучения образца дунита

анализа в море с калифорнием-252 в качестве источника нейтронов [103].

Одни из первых экспериментов выполнены на морском дне с источником ^{252}Cf массой 200 мг (107 мКи). Заключенный в капсулу источник нейтронов и аппаратура для регистрации были доставлены на дно моря для проведения нейтронного активационного анализа на опытных пробах руд [102].

Транспортировка источника на дно и работа с ним осуществлялась ныряльщиками (аквалангистами), устройством для работы в воде с человеком на борту (ныряющее блюдо «Deepstar»). Для перемещения источника по дну и проведения исследований были применены подводные сани, оборудованные подводной телевизионной камерой. Использование подводного телевидения возможно лишь при полной прозрачности воды. Во время перемещения саней взмучиваемый ими ил практически исключал возможность получения информации по телевизионному каналу.

Образцы приготовленной заранее синтетической руды перемешивались в соответствующей пропорции с материалами донных пород и помещались в меченые контейнеры емкостью 3790 см³ (1 галлон). Работа с контейнерами и источником выполнялась аквалангистами (глубины вод 3—15 м) с помощью буксируемых с корабля подводных саней (15—45 м) и «ныряющего блюда».

Значительные перспективы использования ядерно-геофизических методов для исследования минеральных ресурсов морского дна обусловили разработку проектов и конструирование защитных контейнеров для мощных изотопных источников. Для безопасной работы с калифорниевым источником (^{252}Cf) массой 5 мкг нужен плексигласовый контейнер с толщиной стенки 20 см. Для защиты от калифорниевого источника массой 100 мкг необходим бетонный цилиндр с толщиной стенки 75 см, массой 1 т. Защитой от источника массой 1 мг является стальной цилиндрический бокс, заполненный парафином, общей массой около 2 т. Источник массой 10 мг требует защиты из лимонитизированного бетона массой 11 т [88]. Для транспортировки 1 г источника был изготовлен контейнер массой 50 т [111].

По образному выражению Г. Сиборга [111], перспективы использования калифорния в течение 10^4 лет будут определяться, в основном, его стоимостью.

В последнее время проведена серия испытаний калифорниевого источника массой 1 мг для оценки возможностей метода при изучении глубоководных железомарганцевых конкреций [23]. Выбор оптимальных источников и временных параметров измерений позволяет применять сцинтилляционные детекторы вместо полупроводниковых, требующих дополнительного постоянного охлаждения (табл. 33). Рисунки 40, 41 поясняют основные принципы конструирования специальных устройств для

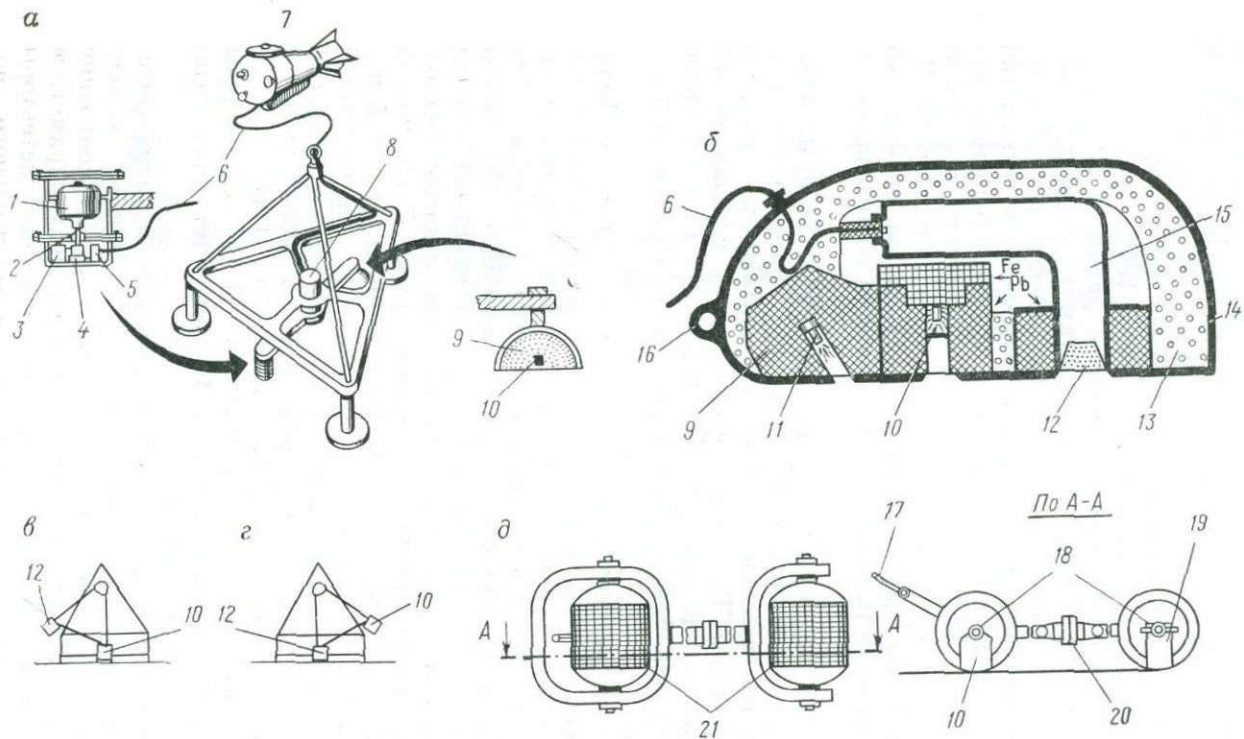


Рис. 41. Эскизные проекты аппаратуры для подводных активационных исследований по станциям (а, в, г) и в движении (б, д).

а — автономный носитель с вращающейся системой «излучатель — детектор» [93]; неподвижная система в режиме: в — облучения, г — измерения [122]; буксируемые системы: б — по данным Г. Бекман, Г. Абдулла (2-th Intern. Kongress, Dusseldorf, 1973); д — по данным [93].
 1 — криостат; 2 — держатель; 3 — кольцо; 4 — ППД; 5 — предусилитель; 6 — кабель; 7 — автономный носитель; 8 — мотор; 9 — защита; 10 — нейтронный источник; 11 — источник гамма-квантов; 12 — СБД; 13 — парафин; 14 — кадмий; 15 — радиосхемы; 16 — кольцо крепления буксира; 17 — кабель-буксир; 18 — оси для крепления излучателя и детектора; 19 — детектор; 20 — карданное сочленение; 21 — защитные цилиндры

Содержание элементов, определяемых нейтронно-активационным анализом с помощью ^{252}Cf

Элемент	Ge (Li)-детектор, 80 см ³		Два монокристалла NaI (Tl) 12,7×12,7 см	
	Энергия, КэВ	Предел* определения, г	Энергия, КэВ	Предел** определения, г
Алюминий	1780	0,3	1780	0,068
Скандий	142	0,001	—	—
Ванадий	1430	0,001	—	—
Марганец	847	0,003	847	0,0075
Кобальт	59	0,007	—	—
Медь	1040	0,08	—	—
Селен	161	0,03	—	—
Родий	51	0,001	—	—
Серебро	633	0,05	633	0,54
Индий	1290	0,001	—	—
Диспрозий	108	0,001	—	—
Ртуть	205	0,08	—	—
Платина	—	—	540	8,6
Золото	—	—	412	0,0042

* При использовании ^{252}Cf массой 5 мг по данным Joseph J., Orphan V.—«Trans. Amer. Nucl. Soc», 1972, vol. 15, № 1.

** При использовании ^{252}Cf массой 10 мг [109].

подводного активационного анализа на станциях и в движении.

Как видно из изложенного, элементный анализ с применением калифорниевых (^{252}Cf) источников может быть широко использован при исследовании минерально-сырьевых ресурсов морского дна. Положительным качеством этого вида анализа в лаборатории является то, что он не требует предварительной подготовки пробы и разрушения образца. После проведения активации пробы могут быть переданы для анализов в другие лаборатории в своем первоначальном состоянии. С другой стороны, чтобы стать прикладным инструментом морских исследований, калифорниевые источники должны иметь при мощности выхода, сопоставимой с реакторной, стоимость, которая позволяла бы широко использовать их в натуральных исследованиях. Тогда на повестке дня остался бы один из последних вопросов — разработка аппаратурно-методического комплекса для радиационно безопасной работы с мощными изотопными источниками на морском дне.

Среди дистанционных методов изучения морского дна в комплексе с другими геофизическими методами и прямым геологическим опробованием морского дна весьма перспективным является применение гаммаметрии, включающей в себя спектрометрию естественного гамма-излучения, а также нейтронно-активационный, нейтронно-радиационный и гамма-активационный анализ морских пород и современных морских осадков в условиях их естественного залегания.

Современные морские осадки могут рассматриваться как аналоги осадков древних седиментационных бассейнов, как носители информации о геологическом строении перекрываемых ими толщ — унаследованно развивающихся антиклинальных поднятиях, очагах грязевулканической деятельности, эманационного «дыхания» по глубинным и приповерхностным разломам. Они являются непосредственными поставщиками минерального сырья — природных и техногенных россыпей, высокоминерализованных рассолов, красных батиальных глин, обогащенных алюминием и кремнеземом, железомарганцевых конкреций и фосфоритов, а также органогенных и хемогенных осадков шельфа и абиссали. В связи с исследованиями естественного гамма-поля значительный интерес представляет выяснение закономерностей распределения естественных радиоактивных элементов — гамма-излучателей и изучение на этой основе условий осадкообразования, процессов неотектоники, непосредственное изучение минерально-сырьевых ресурсов $\frac{2}{3}$ поверхности планеты, перекрытых водами морей и океанов.

Добыча 20—15% мировых запасов нефти, связываемых в настоящее время с морскими и прибрежно-морскими месторождениями, в значительной степени сопряжена с развитием морских геолого-геофизических методов и совершенствованием морского разведочного бурения. В наиболее изученной части шельфа страны — южной половине Каспийского моря разведочным бурением к середине 70-х годов было охвачено 11 площадей, две из которых (о. Булла и Булла-море) ранее были исследованы радиометрическими методами [69].

Начальный этап гаммаметрии, как правило, связан с исследованием естественных гамма-полей и изучением их спектрального

состава в связи с вариациями гамма-полей в районах с развивающимися нефтегазосодержащими антиклинальными поднятиями, тектоническими разломами, грязевыми вулканами; в зонах развития современных россыпей, железомарганцевых конкреций, фосфоритовых стяжений и т. п.

Основная информация получается при сопоставлении данных гамма-поля с составом и строением образцов, отобранных в тех же районах. При правильно выбранной методике последнее позволяет проводить геологические исследования с минимальным отбором прямого геологического материала, без снижения достоверности результирующих построений. Проведение ядерно-геофизических исследований морского дна позволяет получать достоверную, непрерывную, комплексную информацию, используя экспрессную, многоцелевую, инструментальную методику исследований в море.

Гаммаметрия морского дна включает в себя дифференциальное или интегральное исследование естественного и наведенного гамма-поля непрерывными или дискретными измерениями. Изучение спектра наведенного и захватного гамма-излучения может проводиться для прямого элементного анализа морских осадков и пород в условиях их естественного залегания. На этой основе можно выявлять особенности осадочной дифференциации и пространственного размещения ее продуктов в пределах отдельного района (акватории), что необходимо для изучения механизма осадкообразования и научно обоснованного поиска месторождений полезных ископаемых в осадочных породах.

Исследование естественного гамма-поля современных морских осадков проводится в двух аспектах. Первый связан с поисками унаследованно развивающихся антиклинальных структур, отображаемых пониженными значениями гамма-поля, второй — с изучением повышенных значений гамма-поля и исследованием спектра гамма-излучения продуктов грязевулканической деятельности на морском дне, современных прибрежно-морских россыпей, полей развития железомарганцевых конкреций и фосфоритоносных пород. Так, для современных прибрежно-морских титанциркониевых россыпей юго-восточной части Балтийского моря коэффициенты корреляции фотопиков тория и радия с цирконом составили $0,915 \pm 0,034$ и $0,933 \pm 0,027$. Эти же зависимости для титана определились как $0,794 \pm 0,077$ и $0,872 \pm 0,050$ соответственно.

Изменение минералогии и гранулометрии современных морских осадков не является случайным и хаотическим. Оно объективно отражает условия осадкообразования, близость к очагам пенизации, продолжительность переноса частиц и существующие структурно-тектонические условия бассейна седиментации. Исследование современных морских осадков показывает, что по распределению их естественной радиоактивности накапливаются объективные и достоверные данные о самых верхних

(до 30 см) слоях, которые несут в себе информацию о развитии находящихся под ними структурно-тектонических форм.

Отмечаемое в сводах унаследованно развивающихся антиклинальных поднятий преобладание зерен пород, имеющих относительно укрупненные линейные размеры, по сравнению с откладываемыми в пониженных синклинальных зонах обусловлено механизмом образования осадка. Как показывают проведенные исследования, естественная радиоактивность донных грунтов, определяемая минеральным составом осадка и степенью его глинистости, литологически дифференцирует современные морские осадки. Гаммаметрия морского дна позволяет увязывать зависимость глубинного геологического строения с процессами современного осадкообразования, что, будучи сопоставлено с литолого-фациальными изменениями при палеогеографических реконструкциях, позволяет более обоснованно прогнозировать поиски и разведку полезных ископаемых в осадочных породах.

При изучении подводных (особенно россыпных) месторождений металлов перспективно применение методов, основанных на спектрометрии естественного, наведенного и захватного гамма-излучения. Последние могут осуществляться как на борту специально оборудованного исследовательского судна, так и в условиях природного залегания осадков. Применение специальных заглубляющих устройств позволит получать информацию о составе верхних нескольких десятков, а может быть, и сотен метров осадков.

Применение гаммаметрии морского дна следует комплексировать с активационными элементами исследованиями водных толщ для комплексного изучения системы «вода — осадок — порода».

1. Аксенов А. А. О рудном процессе в верхней зоне шельфа. М., «Наука», 1972. 159 с. с ил.
2. Алексеев Ф. А., Готтих Р. П., Лебедев В. С. Использование ядерных методов в нефтегазовой геологии. М., «Недра», 1973. 384 с. с ил.
3. Альтгаузен М. Н. Причины возникновения эпохи накопления редких металлов и фосфора в морских осадках нижнего палеозоя. М., Госгеолтехиздат, 1956. 16 с. с ил.
4. Артеменко В. И., Смирнов Я. Б. К обоснованию метода термической разведки на шельфе. — В кн.: Геотермия. Отчеты по геотермическим исследованиям в СССР, вып. 1—2. М., изд. ГИН АН СССР, 1974. 152—159 с. с ил.
5. Аэрогаммаспектрометрический метод поисков месторождений урановых руд (методическое руководство). Ред. Г. С. Смирнов, Ф. М. Корнилов, Н. Д. Тихомиров, В. А. Смирнов. Изд. Мингео СССР, 1967. 228 с. с ил.
6. Баранов В. И., Радиометрия. М., Изд-во АН СССР, 1956. 343 с. с ил.
7. Баранов В. И., Христианова Л. А. Радиоактивность океанических отложений. — В кн.: Химия земной коры. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1963. с. 401—408 с ил.
8. Батулин Г. Н. Современное и верхнечетвертичное фосфоритообразование на шельфах океанов. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. докт. геол.-минерал. наук. М., Ин-т океанологии АН СССР, 1975. 48 с.
9. Батулин Г. Н. Уран в современном морском осадкообразовании. М., Атомиздат, 1975. 152 с. с ил.
10. Батулин Г. Н., Блисковский В. З., Лисицын А. П. Верхнечетвертичные фосфоритовые конкреции у побережья Перу. — «Океанология», 1975, т. 15, № 3, с. 484—488 с ил.
11. Булашевич Ю. П. Эквивалентность объемного и поверхностного излучения. — «Труды ГИ УФ АН СССР», вып. 30, № 2. Свердловск, 1957, с. 146—151 с ил.
12. Васильчиков Н. В. О первом эксперименте по отбору днечерпательных проб с борта вертолета при металлотрической съемке пляжа и дна мелководья арктических морей. — «Океанология», 1974, т. 14, № 3, с. 579—581 с ил.
13. Вестник золотопромышленности и горного дела. Томск, 1898, т. VII, № 22, с. 531.
14. Войткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А. Справочник по теории корабля. Л., «Судостроение», 1973. 511 с. с ил.
15. Воробьев В. П., Чернышева В. С. Минералогическое изучение тяжелой фракции морских осадков шельфа Японского моря. — Изв. вузов. Сер. Геол. и разв., 1972, № 1, с. 42—50 с ил.
16. Геологические предпосылки поисков урановых месторождений. Ред. В. И. Красников. М., Атомиздат, 1964. 187 с. с ил.
17. Геология Азовского моря. Киев, «Наукова думка», 1974. 247 с. с ил. Авт.: Е. Ф. Шнюков, Г. Н. Орловский, В. П. Усенко.

18. Гудков П. П. Аскольдовский рудник и другие месторождения золота на острове Аскольда. Владивосток, изд. Гос. ДВ ун-та, 1921. 25 с.
19. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., «Недра», 1972. 365 с. с ил.
20. Ермаков В. И., Пейсиков Ю. В., Шацов А. Н. Исследования радиоактивности морского дна. — «Ядерная геофизика», вып. 1961 г. М., Гостоптехиздат, 1962, с. 137—153 с ил.
21. Жабрев И. П. Азовское море — новый нефтегазоносный район страны. — «Газовая промышленность», 1974, № 2, с. 16, 17 с ил.
22. Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. М., Изд-во АН СССР, 1962.
23. Значение литолого-тектонических исследований в нефтяной геологии. — «Ресурсы и основные направления поисково-разведочных работ на нефть и газ», вып. 154. М., изд. ВНИГНИ, 1974, с. 225—245 с ил. Авт.: Г. А. Каледа, М. А. Алексеева, С. М. Аронова и др.
24. Кашеев Л. П., Кушнарев П. И., Хершберг Л. Б. Основные черты геологического строения и изменчивость геологоразведочных параметров прибрежной морской россыпи. — «Изв. вузов. Сер. геол. и разв.», 1972, № 1, с. 76—82 с ил.
25. Кашеев Л. П., Кушнарев П. И. Обоснование параметров пробоотбора при разведке прибрежно-морских россыпей золота. — «Изв. вузов. Сер. геол. и разв.», 1974, № 1 с. 88—92 с ил.
26. Ковалев В. А. Геохимические аспекты исследования отношения Th/U в осадочных породах. — «Геохимия», 1965, № 9, с. 1171—1173.
27. Коган Р. М., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. М., Атомиздат, 1969. 468 с. с ил.
28. Колесниченко Е. Ф., Кравцова Л. М., Питулько В. М. О возможности ореолов поисков россыпных и коренных месторождений олова по гипергенным ореолам рассеяния бора. — «Колыма», 1973, № 5, с. 38—40.
29. Крутецкий И. В., Цвигельберг Г. В. К вопросу о неконтактном измерении электромагнитных параметров морских грунтов. — «Труды Северо-Западного заочного политехн. ин-та», вып. 25. Л., Изд-во Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР, 1974, с. 5—7.
30. Лейпунский О. И., Новожилов Б. В., Сахаров В. Н. Распространение гамма-квантов в веществе. М., Физматгиз, 1960. 208 с. с ил.
31. Лугов С. Ф. Металлогения олова Советской части Тихоокеанского рудного пояса. — В кн.: Закономерности размещения полезных ископаемых, вып. X. М., «Наука», 1973, с. 138—152.
32. Лухминский Б. Е., Степанов В. А. Расчет аппаратурных спектров естественного гамма-излучения донных грунтов методом Монте-Карло. — В кн.: Теория функций и применение методов Монте-Карло. Уфа, изд. Башкирского филиала АН СССР, 1975, с. 140—144 с ил.
33. Маев Е. Г. Мощности современных отложений и скорости осадкообразования в Южном Каспии. — «Океанология», 1961, т. 1, № 4, с. 658—663 с ил.
34. Мартиросова А. О. Естественная радиоактивность осадочных пород некоторых областей Азербайджана. — «Геология нефти и газа», 1963, № 12, с. 36—41 с ил.
35. Мартиросова А. О., Мухаринская И. А., Минзберг Л. В. Зависимость гамма-активности от гранулометрического состава и удельной поверхности зерен песчано-алевритовых пород продуктивной толщи. — «Азербайджанское нефтяное хозяйство», 1960, № 3, с. 1—5 с ил.
36. Матвеев В. В., Хазанов Б. И. Приборы для измерения ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1972. 695 с. с ил.
37. Махмудова В. М. О характере рельефа бассейна осадконакопления нижнего отдела продуктивной толщи в южной прибрежной полосе Апшеронского полуострова. — «Азербайджанское нефтяное хозяйство», 1964, № 2, с. 4—7 с ил.

38. Мельников Н. В. Будущие горные разработки. — «Горный журнал», 1974, № 2, с. 3—9.
39. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучения. Под ред. Г. И. Марчук, М., Атомиздат, 1967. 256 с. с ил.
40. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Под ред. Ю. А. Шрейдер, М., Физматгиз, 1962. 331 с. с ил.
41. Методические указания по применению радиометрических методов для поисков и разведки руд нерадиоактивных элементов и геологического картирования. Вып. 1. М., Госгеолтехиздат, 1963. 189 с. с ил.
42. Методы поисков урановых месторождений. Отв. ред. Д. Я. Суражский, М., «Недра», 1969. 390 с. с ил.
43. Минеральные ресурсы шельфовых зон морей и океанов промышленно развитых капиталистических и развивающихся стран (обзор). Под ред. Н. П. Лаврова, М., изд. ВГФ Мингео СССР, 1972. 75 с. с ил.
44. Морозов В. И., Петрусов С. С., Федоровский Ю. П. Гамма-радиометр для непрерывной регистрации низких уровней загрязненности морской воды. — «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 2, с. 163, 164 с ил.
45. Невесский Е. Н., Костоглодов В. В. Новые результаты литологического изучения донных осадков с помощью многоканальной радиометрической съемки. — «Океанология», 1975, т. 15, № 2, с. 289—295 с ил.
46. Непрерывный радиометрический метод определения P_2O_5 в фосфоритных рудах. — «Химическая промышленность», 1974, № 6, с. 48—49. Авт.: М. А. Беляков, В. А. Акиндинов, Э. В. Анчевский, Э. П. Терентьев.
47. Новые методы изучения морских отложений с борта судна. — В кн.: Проблемы геологии шельфа. М., «Наука», 1975, с. 257—265 с ил. Авт.: Е. Н. Невесский, С. С. Петрусов, В. В. Калинин, В. И. Морозов.
48. Определение содержания титана, циркония и гафния в пробах современных россыпей Балтийского моря гамма-активационным методом. — «Труды ВНИИЯГГ», вып. 13. М., «Недра», 1972, с. 32—38 с ил. Авт.: Ю. Т. Мартынов, Г. С. Семенов, В. В. Сулин и др.
49. Островская Г. Я. Об уране в породах фосфоритоносных формаций. — «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 3, с. 189—194.
50. Павлов В. В., Константинов И. Е., Федоров Г. А. Экспоненциальный источник как модель радиоактивных загрязнений почвы. М., Атомиздат, 1968. 13 с. с ил.
51. Павлов В. И., Шило Н. А. Пространственное размещение оловянных россыпей Северо-Востока и их связь с коренными источниками. — В кн.: Проблемы геологии россыпей. Магадан, 1970, с. 80—97.
52. Полак Л. С. Некоторые закономерности естественной радиоактивности мезозойских и третичных отложений Прикаспийской впадины. — «Прикладная геофизика», вып. 17. М., Гостоптехиздат, 1957, с. 274—283 с ил.
53. Применение морской радиометрии при геологическом изучении шельфа Южного Приморья. — В кн.: Проблемы геологии шельфа. М., «Наука», 1975, с. 268—271 с ил. Авт.: Г. М. Гусейнов, А. А. Емельянов, В. М. Соболев и др.
54. Радиогеохимические исследования. Методические рекомендации. Ред. А. А. Смыслов, М., изд. Мингео СССР, 1974. 144 с. с ил.
55. Саркисов Г. А., Тагиев З. Б. Опыт применения электропрофилирования и геоакустики при изучении геоморфологии и картировании дна морей. — «Разведочная геофизика», вып. 63. М., «Недра», 1974, с. 86—91 с ил.
56. Скважинный многоканальный гаммаспектрометр СГС-1 и опыт его использования при ядерно-геофизических исследованиях. — «БНТИ. Сер. Регион. разв. и промысл. геофиз.», № 14. М., ВИЭМС, 1969. 102 с, с ил.
57. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. Л., «Недра», 1974. 231 с. с ил.

58. Современное гидротермальное рудоотложение. Под ред. Э. Дегенс, Д. Росс. М., «Мир», 1974. 280 с. с ил.
59. Спенсер Л. В. Защита от гамма-излучений радиоактивных выпадений. М., Атомиздат, 1965. 148 с. с ил.
60. Справочник по радиометрии для геофизиков и геологов. М., Госгеолтехиздат, 1957. 199 с. с ил.
61. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1962. 212 с. с ил.
62. Технологическая оценка золота в титано-циркониевых песках морского происхождения. — В кн.: Технология обработки и вещественный состав золотосодержащих руд и песков. М., изд. ЦНИГРИ, 1969, с. 130—133 с ил. Авт.: Н. Л. Горенков, А. И. Никулин, Э. Р. Гегина и др.
63. Требования промышленности к качеству минерального сырья (цирконий, гафний), вып. 45. М., Госгеолтехиздат, 1959. 35 с. с ил.
64. Ференс-Сороцкий А. А., Удот Г. Д. Некоторые новые данные о геоморфологической выраженности локальных структур и приуроченных к ним месторождений нефти и газа Тимано-Печорской провинции. — «Труды ВНИГРИ», вып. 339. Л., «Недра», 1973, с. 80—93 с ил.
65. Филиппов Е. М., Вахтин Б. С., Новоселов А. В. Нейтрон-нейтронный и нейтронный гамма-методы в рудной геофизике. Новосибирск, «Наука», 1972. 347 с. с ил.
66. Халилов Н. Ю. История развития складчатых структур северной части Апшеронского архипелага в плиоцене. — «Азербайджанское нефтяное хозяйство», 1962, № 8, с. 7—9 с ил.
67. Шарков В. В. Геология подводного склона Западного берега Каспийского моря (от г. Махачкала до устья р. Куры). М.—Л., «Наука», 1964. 430 с. с ил.
68. Шатский Н. С. Избранные труды. Т. 3. М., «Наука», 1965. 348 с. с ил.
69. Шацов А. Н. Морская радиометрия. М., «Недра», 1969. 100 с. с ил.
70. Шевалиевский И. Д. Разработка методов количественного рентгено-спектрального анализа гафния и циркония и его применение для геохимических исследований. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. хим. наук. М., ГЕОХИ АН СССР, 1959. 15 с.
71. Ядерно-геофизические измерения параметров плотности морских донных отложений. — «Геологический журнал», 1974, т. 34, вып. 6, с. 41—50 с ил. Авт.: А. Е. Бабинец, С. Т. Звольский, С. Н. Молгановский, П. К. Вовк.
72. Якубович А. Л., Зайцев Е. И., Пржиялговский С. М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. М., Атомиздат, 1973. 391 с. с ил.
73. A ^{252}Cf neutron source for laboratory and possible in situ mineral analysis. — «Transact. Amer. Nucl. Soc.», 1970, vol. 13, No 1, p. 63—64. Auth.: R. W. Percins, L. A. Rancitelli, J. A. Cooper, R. E. Brown.
74. A revaluation of the marine geochemistry of uranium — In: Radioactive contamination of the marine environment. Proceedings of a symposium. Seattle, 10—14 July 1972. IAEA Vienna, 1973, p. 757—769, ill. Auth.: W. M. Sackett, T. Mo, R. F. Spalding, M. E. Exner.
75. Adams J. A. S., Gasparini P. Gamma-ray spectrometry of rocks, — «Methods of Geochem. and Geophys.», No. 10. New-York, 1970, 295 p., ill.
76. Albers J. P., Meyer R. F. New information of worldwide seabed resources. — «Ocean Management», 1974, vol. 2, No 1, p. 61—74.
77. Applied gamma-ray spectrometry. Edby C. E. Grouthamel Pergamon Press New-York, 1970, vol. 41, 753 p., ill.
78. Barry W., Haas R. Deep sea telemetry system for sediment analysis. — «IEEE Conf. Eng. Ocean Environ. Rec.». San Diego, Calif., 1971. New-York, 1971, p. 188—191.
79. Boyssse P. La recherche miniere sur la marge continentale — la defini-

tion d'une politique nationale. Aménagement de la marge continentale hommes et robots. Colloques de la 'ASTEO, Anne 1972, p. 1—13.

80. Bowie S. H. U., Claiton C. G. Gamma spectrometer for sea-or lakebottom surveying.—«Trans. Inst. Mining and Metal.» 1972, B 81, Nov., p. 215—216, ill.

81. Continuous gamma-ray spectroscopy in the natural environment.—«IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1973, vol. 20, No. 1, p. 48—53. Auth.: R. Gold, A. M. Strash, F. J. Congel, J. H. Roberts.

82. Crockett J. H., Macdougall J. D., Harriss R. C. Gold, palladium and iridium in marine sediments.—«Geochim., Cosm. Acta», 1973, vol. 37, No. 12, p. 2547—2556, ill.

83. Drill-core scanning for radioelements by gamma-ray spectrometry.—«Geophysics», 1972, vol. 37, No. 4, p. 675—693, ill. Auth.: L. Lovborg, H. Wollenberg, J. Rose-Hansen, B. L. Nielsen.

84. Elkady A. A., Duffey D., Wiggins P. F. Neutron capture γ -ray techniques for iron and gold in mixtures.—«Analytica Chimica Acta», 1971, vol. 54, p. 97—104, ill.

85. Erchul R. A., Nacci V. A. Electrical resistivity measuring system for porosity determination of marine sediments.—«Marine Technol. Soc. Journ.», 1972, vol. 6, No. 4, p. 47—53, ill.

86. Friedrich G. H., Kunzendorf H., Plüger W. L. Ship-borne geochemical investigations of deep-sea manganese-nodule deposits in the Pacific using a radioisotope energy-dispersive X-ray system.—«Journ. Geochem. Explor.», 1974, vol. 3, No. 4, p. 303—317, ill.

87. Fano U. Gamma-ray attenuation.—«Nucleonics», 1953, vol. 11, No. 8, p. 8—12, No. 9, 55—61, ill.

88. Gijbels R. Neutron activation analysis of ores and minerals.—«Miner. Sci. Eng.», 1973, vol. 5, No. 4, p. 304—348, ill.

89. Harvell at Europort 73.—«Atom», England, 1973, No. 206, p. 268—270, ill.

90. Hilmer E., Prokop F. W., Schiebel W. Erfahrungen bei der Prospection und Exploration auf Kupfervorkommen im Gebiet von Murgul Nordost—Türkei.—«Erzmetall», 1974, Band 27, No. 3, S. 117—126.

91. Kolodny J., Kaplan J. Uranium isotopes in sea-floor phosphorites.—«Geochim., Cosmochim. Acta», 1970, vol. 34, No. 1, pp. 3—24, ill.

92. Ku T. L., Broecker W. S. Radiochemical studies on manganese nodules of deep-sea origin.—«Deep sea res.», 1969, vol. 16, p. 625—637, ill.

93. Laboratory and environmental mineral analysis using a californium-252 neutron source.—«Nuclear Appl. Technol.», 1970, vol. 9, No. 8, pp. 861—874, ill. Auth: R. W. Percins, L. A. Rancitelli, J. A. Cooper, R. E. Brown.

94. Lasers and masers. Series I. Riverdale (Md.), Cambridge scientific abstracts inc. 1974, 348 p.

95. Manheim F. T. Red sea hot brine-metal deposits.—«Acta Geol. Acad. Sci. Hung.», 1973, vol. 17, No. 4, p. 383—389.

96. Marine science affairs—a year of broadened participation.—«The third report of the President to the Congress on marine resources. and engineering development», Washington, Gov. print Off., 1969, 251 p. ill.

97. Maus L. D., Rose V. C., Nacci V. A. Gamma-ray monitoring of sediment consolidation tests.—«Ocean Eng.», 1973, vol. 2, No. 4, p. 195—205, ill.

98. Miller C. E., Marinelli L. D., Rowland R. E. Reduction of NaI (Tl) background.—«Nucleonics», 1956, vol. 14, No. 4, p. 40—43.

99. Miller J. M., Symonds G. D. Radiometric traverse of the seabed off the Yorkshire coast.—«Nature», 1973, vol. 242, No. 5394, p. 184—186, ill.

100. Minato S., Kavano M. On the constitution of terrestrial gamma-radiation.—«Journ. Geoph. Res.», 1970, vol. 75, No. 29, p. 5825—5830, ill.

101. Nauke M. Rotschelamm-Verklappung in der Nordsee.—«Meerestechnik». 1974, vol. 5, No. 5, p. 149—153, ill.

102. Noakes J. E., Harding J. L. New techniques in seafloor mineral exploration. — «Marine Techn. Soc. J.», 1971, vol. 5, No. 6, p. 41—44, ill.
103. Noakes J. E., Harding J. L., Spolding J. D. Californium-252 as a new oceanographic tool. Preprints 8-th annual conf. and exposit. Marine Technol. Soc. 1972 september 11—13. Washington D. T. 1973, p. 415—428, ill.
104. Noakes J. E., Harding J. L., Spaulding J. D. Locating offshore mineral deposits by natural radioactive measurements. — «Marine Techn. Soc. J.», 1974, vol. 8, No. 5, p. 36—39, ill.
105. Phosphorite prospecting using a submersible scintillation counter. — «Econ. Geol.», 1970, vol. 65, No. 6, p. 718—723, ill. Auth.: C. P. Summerhayes B. H. Hazelhoff—Roelfzema, J. S. Tooms, D. B. Smith.
106. Pierce J. W., Siegel F. R. Marine bottom sampling from helicopter. — «Marine Techn. Soc. J.», 1972, vol. 6, No. 6, p. 34—36.
107. Preliminary study on the use of fast-neutron activation analysis on seafloor compositional mapping — In: Proceedings of the symposium on the use of nuclear techniques in the prospecting and development of mineral resources. IAEA, Vienna, 1969, SM—112/30, pp. 463—489, ill. Auth.: G. G. Santos, L. E. Fite, W. E. Kujkendall and all.
108. Postdepositional mobility of some transition elements, phosphorus, uranium and thorium in deep-sea sediments. — «Geochim., Cosm. Acta», 1971, vol. 35, p. 189—201, ill. Auth.: E. Bonatti, D. E. Fisher, O. Joensuu, H. S. Rydell.
109. Ricci E., Handley T. Activation analysis with californium-252. — «Anal. Chemistry», 1970, vol. 42, No. 3, p. 378—382, ill.
110. Seafloor mineral-forming processes. — «Milit. Eng.», 1974, vol. 66, No. 429, p. 50.
111. Seaborg G. T. The synthetic actinides — from discovery to manufacture. — «Nucl. Appl., Techn.», 1970, vol. 9, p. 830—850, ill.
112. Schmidt-Mende P. Möglichkeiten der Urangewinnung aus Sedimenten der Nordsee. — «Meerestechnik», 1974, Band. 5, No. 3, S. 81—85, ill.
113. Schornick J. C. Uranium and thorium isotope geochemistry in ferromanganese concretions from the Southern Ocean. — «Sedimentol. Res. Lab. Dep. Geol. Fla State Univ. Contrib.», 1972, No. 34, 161 p., ill.
114. Tamrazyan G. P. Peculiarities in the Manifestation of gaseous mud volcanoes. — «Nature», 1972, vol. 240, No. 5381, p. 406—408, ill.
115. The determination of gold in ores and solutions by activation analysis with a neutron generator. — «Intern. Journ. Appl. Rad. Isot.», 1968, vol. 19, No. 8, p. 615—623, ill. Auth.: E. A. Uken, J. I. Watterson, A. Knight, J. P. F. Sellschop.
116. Tsujiuchi J., Ueha S., Ueno K. Holographic synthetic aperture sonar system. — «Ultrason. Imag. and Hologr. Med. Sonar and Opt. Appl.» New York—London, 1974, p. 531—552.
117. Underwater laser detector. — «Technocrat», 1975, vol. 8, No. 1, p. 87.
118. Veeh H. H., Burnett W. C. Contemporary phosphorites on the continental margin of Peru. — «Science», 1973, vol. 181, No. 4102, p. 844—845, ill.
119. Verot J. L. Possibilités d'applications industrielles de sources de californium—252 pour l'analyse par activation. — «Journ. Radional. Chem.», 1974, vol. 19, No. 1, p. 177—183, ill.
120. Wiggins P. F., Athow K. Neutron-capture gamma-ray studies of chlorine in salt water using ²⁵²Cf. — «Amer. Nucl. Soc. Transact.», 1971, vol. 14, No. 1, p. 129—130, ill.
121. Wiggins P. F., Duffey D., Elkady A. A. Neutron-capture gamma-ray studies of marine manganese nodules using a nuclear reactor and a californium-252 source. — «Anal. Chem. Acta», 1972, vol. 61, p. 421—430, ill.
122. Wogman N. A., Rieck H. G., Nielsen H. L. In situ analysis of the major and minor elements in manganese fields 211BO1159. — «Marine Techn. Soc. J.», 1973, vol. 7, No. 6, p. 35—40, ill.

Содержание

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5
Основы теории метода	13
Естественные радиоактивные элементы в современных морских осадках	13
Гамма-поле морского дна и методы его изучения	18
Применение аналитических и статистических методов для решения задач морской гаммаметрии	21
Аппаратура, методика и техника исследований гамма-поля морского дна и обработка результатов съемки	29
Основные принципы построения аппаратуры	30
Конструктивное выполнение и динамика поведения аппаратурных контейнеров на дне	39
Методика и техника исследований на типовых плавсредствах и на автомобиле-амфибии	46
Приемы обработки и интерпретации результатов съемки	56
Поиски антиклинальных структур и решение некоторых геологических задач на шельфе методами гаммаметрии	66
Геологическая информативность современных морских осадков и ее отображение в гамма-поле	66
Прямое геологическое картирование морского дна и изучение литодинамических процессов мелководной части шельфа (приустьевых зон)	70
Гамма-поле морских осадков в зоне развития конседиментационных структур	76
Применение гаммаметрии для поисков антиклинальных структур в юго-западной части Каспийского и северо-западной части Азовского морей	84
Поиски современных прибрежно-морских россыпей методом гаммаметрии	101
Гамма-спектрометрия титан-циркониевых россыпей юго-восточной части Балтийского моря	104
Гаммаметрия прибрежных зон и образцов	120
Определение золота, гафния, циркония и титана активационными методами	131
Возможности гаммаметрии при поисках фосфоритов, железомарганцевых конкреций и перспективы применения активационного элементного анализа пород морского дна	139
Гамма-спектрометрия фосфорсодержащих осадков шельфа	139
Исследование железомарганцевых конкреций, высокоминерализованных рассолов и илов	143
Перспективы применения изотопных и генераторных источников излучений для элементного анализа пород морского дна	148
Заключение	158
Список литературы	161
	167

ИБ № 1482

Анатолий Нахманович ШАЦОВ

**ГАММАМЕТРИЯ МОРСКОГО ДНА
ПРИ ПОИСКАХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Редактор издательства *И. П. Иночкина*

Обложка художника *С. А. Смирновой*

Художественный редактор *В. В. Шутько*

Технический редактор *О. Н. Ласточкина*

Корректор *А. П. Стальнова*

Сдано в набор 29/XI 1976 г.

Подписано в печать 21/IV 1977 г.

Т-08271 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага № 1 Печ. л. 10,5

Уч.-изд. л. 11,21 Тираж 1200 экз. Заказ 2575/5639-3

Цена 60 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

60 коп.

2317

НЕДРА