

2. Действие понижающих излучений на неорганические и органические системы. М., Изд-во АН СССР, 1958.
3. Изотопы и излучения. М., Изд-во АН СССР, 1957.
4. Труды I Всесоюзного совещания по радиационной химии (Москва, март, 1957 г.). М., Изд-во АН СССР, 1958.
5. Труды II Всесоюзного совещания по радиационной химии (Москва, октябрь 1960 г.). М., Изд-во АН СССР, 1962.
6. Радиационная химия полимеров. М., «Наука», 1966.
7. С. Я. Пшечек и др. Механизм радиационно-химических реакций. М., «Химия», 1968.
8. А. Х. Брегер. Источники ядерных излучений

- и их применение в радиационнохимических процессах. М., ВИНТИ, 1960.
9. А. Х. Брегер и др. Основы радиационно-химического аппаратостроения. Атомиздат, 1967.
10. Радиолит углеводородов. Под ред. А. В. Толчьева и Л. С. Положа. М., Изд-во АН СССР, 1962.
11. Элементарные процессы химии высоких энергий. М., «Наука», 1965.
12. Всесоюзная научно-техническая конференция «XX лет производства и применения изотопов и источников ядерных излучений в народном хозяйстве СССР». Секция «Радиационная химия» (тезисы докладов). М., Атомиздат, 1968.

Ядерные излучения и изотопы в изучении земной коры при поисках и разведке полезных ископаемых

Ф. А. АЛЕКСЕЕВ, А. П. ОЧКУР, В. И. ФЕРРОНСКИЙ

Ядерная физика оказывает все возрастающее влияние на науки о земле — геологию, геофизику и геохимию, в области которых начинают все шире использоваться результаты исследований и методы ядерной физики и радиогеохимии для решения кардинальных проблем развития земной коры. Проникновение ядерной физики в геологию, геофизику и геохимию привело к появлению новых методов поисков и разведки полезных ископаемых и контроля за их разработкой, основанных на ядерных процессах, — *ядерной геофизики*. Проникновение ядерной физики в геологические науки привело к возникновению новой области знаний о радиоактивных ядерных свойствах земной коры и в целом нашей планеты — *ядерной геологии*.

Все большее значение приобретают методы ядерной физики в изучении водных масс морских акваторий и Мирового океана, что привело к зарождению новой отрасли знания — *ядерной океанологии*.

Ядерная геология

Ядерная геология как научное направление, предусматривающее широкий комплекс исследований, связанных с изучением радиоактивных элементов и их изотопов, ядерных излучений и продуктов распада ядер радиоактивных элементов, космогенных элементов и изотопов стабильных элементов, с ростом измерительной техники приобретает большое значение при геологических исследованиях и решении широкого круга практических задач при поисках и разведке полезных ископаемых, в частности при изучении геологических разрезов, условий

образования горных пород и полезных ископаемых и закономерностей их распространения в земной коре.

Радиоактивные элементы и их изотопы. Возможность использования радиоактивных элементов и их соотношения в осадочных породах для решения различных геологических задач отмечалась рядом исследователей. В нашей стране в работах В. И. Вернадского, А. П. Виноградова, В. И. Баранова, А. Б. Ронина, И. Е. Старика, В. В. Щербины и др., а также и за рубежом, например в работах Дж. Адамса, Ч. Уивера, Е. Муррея, дано обобщение имеющихся данных относительно распределения урана, тория и калия в осадочных породах и показана возможность использования их при решении вопросов геологии.

В последние годы в нашей стране проводятся исследования по изучению естественной радиоактивности разрезов нефтегазоносных и других областей с решением широкого круга практических вопросов.

Анализ накопленного материала по распределению радиоактивных элементов в разрезе осадочных образований древних бассейнов седиментации показывает, что их распределение подчиняется определенным закономерностям. Установленные закономерности в характере распределения радиоактивных элементов по площади бассейна могут быть успешно использованы для восстановления условий, существовавших в области седиментации (тектонический режим, климат, физико-химический режим бассейна), определения положения области сноса, состава разрушающихся пород, выяснения размеров и конфигурации бассейна, рельефа морского дна, выделения литолого-

фациальных зон, т. е. вопросов, необходимых для палеогеографических реконструкций.

Проведенные нами достаточно обширные исследования по Аму-Дарьинскому нефтегазовому бассейну показали, что, несмотря на сохранение в целом конфигурации бассейна на протяжении всего мелового времени, каждое из стратиграфических подразделений характеризуется определенным количественным содержанием радиоактивных элементов.

Использование скважинной спектрометрической аппаратуры позволило раскрыть большие возможности радиометрии в решении практических вопросов нефтегазовой геологии. С помощью спектрометрии естественного излучения при исследовании скважин гамма-спектрометром СГС-1 представилось возможным однозначно решить вопрос о границе продуктивных горизонтов D_1 и D_2 Ромашкинского нефтяного месторождения. Это расчленение основано на изменении величины отношения торий — уран, которое для отложений D_1 примерно в 1,5 раза больше, чем для пород горизонта D_2 . Решение этого вопроса имеет значение для правильного определения объемов коллекторов при подсчете запасов нефти, а также, что особенно важно, при анализе и контроле за разработкой отдельных пластов месторождения.

Использование гамма-спектрометрических измерений в скважинах позволяет выделить в карбонатном разрезе участки вторичной доломитизации, обладающие высокими коллекторскими свойствами. В основе такого подразделения разреза лежит определение величины отношения торий — уран: доломиты характеризуются в два раза меньшей величиной отношений торий — уран по сравнению с однообразными известняками. Определение зон вторичной доломитизации представляет большой практический интерес при разработке нефтяных и газовых залежей, так как эту задачу нельзя решить другими методами. Метод гамма-спектрометрии позволяет успешно решать задачи корреляции сложных разрезов и оценивать степень глинистости карбонатных отложений. Увеличение глинистости карбонатов сопровождается ростом содержания тория и калия и величины отношений торий — уран.

Изучение естественного γ -поля земной коры на основании данных гамма-каротажа скважин по различным этажам геологического разреза нефтяных месторождений показало, что наблюдаемые над нефтяными и газовыми месторождениями радиометрические аномалии отражают

положительные тектонические структуры. Геологические структуры, развивающиеся в процессе осадконакопления, сопровождаются закономерной литологической дифференциацией отлагающегося материала по площади структуры. В сводовых частях структур, соответствующих приподнятым участкам морского дна, отлагаются более крупнозернистые осадки, в то время как наиболее тонкие фракции осадков отлагаются в прогибах. Эта закономерная картина литологической дифференциации материала отчетливо фиксируется при изучении естественного γ -поля как поверхности современного осадконакопления (зоны шельфа Каспийского, Азовского и Черного морей, районы Туркменской и Азербайджанской ССР, Нижнее Поволжье и др.), так и отдельных горизонтов геологического разреза. При этом отмечается следующее: чем активнее тектонические движения в процессе осадконакопления и чем больше амплитуда поднятия, тем сильнее различие в интенсивности γ -поля свода структуры и крыльев.

Таким образом, радиометрический метод можно успешно применять при изучении новейших и современных тектонических движений по распределению интенсивности естественного γ -излучения на поверхности земли. В условиях относительно равнинного, степного и пустынного ландшафтов естественное γ -поле земной поверхности может явиться одним из элементов изучения и выделения зон восходящих и нисходящих движений, поисков и выделения тектонических структур конседиментационного формирования по пониженным значениям естественного γ -поля земной поверхности. В районах, где поиски структур являются одной из важнейших задач поисков и разведки нефтегазовых месторождений, использование радиометрического метода для этих целей может оказаться весьма эффективным.

Проведенные за последнее время опытно-методические исследования раскрывают большие возможности применения радиометрического метода для поисков подводных россыпных месторождений. Детальные исследования проводились в зоне титановых россыпей прибрежно-морского генезиса юго-восточной части Балтийского моря и в меньшей степени северо-западной части Азовского моря, обусловленных многократной сортировкой рыхлого обломочного материала при его перемещении волнами и течением.

За последние годы благодаря работам Всесоюзного научно-исследовательского института

ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ) получены новые материалы по содержанию и распределению радиоактивных элементов в породах глубинных зон земной коры (верхняя мантия), которые позволяют решить ряд геохимических задач, имеющих практическое значение.

Сопоставление различных оценок приводит к выводу, что одним из главных источников внутреннего тепла нашей планеты является распад радиоактивных элементов, среди которых ведущую роль играют уран, торий и калий. Важным вопросом геотермики является вопрос о распределении основных источников тепла по глубинам.

Из сопоставления различных косвенных данных, на основании которых строятся представления о средних содержаниях радиоактивных элементов в Земле, следует, что содержание основных источников радиогенного тепла в земной коре гораздо больше, чем среднее содержание этих элементов во всей Земле в целом. Такое распределение источников радиогенного тепла — одна из особенностей внутреннего строения Земли. Однако до настоящего времени в литературе не высказывались какие-либо представления о причинах, вызвавших вынос радиоактивных элементов в наружный слой, а также нет надежных данных по содержанию урана в породах верхней мантии.

В настоящее время известно большое число определений урана для пород амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма так же, как для гранитов и базальтов; амфиболитовая фация и гранитоиды содержат уран в количестве первых единиц $г/т$, а пироксен-гранулитовая фация и базальты содержат десятки доли $г/т$.

Очень мало данных по эклогитовым породам, что объясняется трудностью определения малых количеств урана в этих породах и тем, что эклогитовые породы мантийного происхождения встречаются крайне редко. Первые определения урана были проведены Холмсом в 1939 г. По эклогитам метаморфических комплексов и по глубинным включениям из кимберлитов Африки известны определения Хайера (1963 г.). Эти определения сделаны гамма-спектрометрическим методом, полученные значения оценивались в десятые доли $г/т$. Судя по описанию пород, исследовались образцы, измененные в той или иной степени. Из-за влияния вторичных процессов количество урана не отвечает, по-видимому, первичному содержанию и значительно завышено.

В настоящее время известны данные Ловеринга и Моргана (1963 г.), полученные более точным методом нейтронной активации. Включения эклогитов из трубок взрыва однозначно дают цифры порядка сотых долей $г/т$. Содержания урана в эклогитах коры на порядок выше, хотя имеются исключения для оливнинового эклогита и пиропита. Аналогичные данные были получены Тилтоном (1956 и 1963 гг.) методом изотопного разбавления.

Содержание радиоактивных элементов в пироповых гипербазитах (мантийных) и эклогитах трубки «Обнаженная» Таблица 1

Номера проб	Порода	Содержание радиоактивных элементов, %			
		Ra · 10 ⁻¹¹	Th · 10 ⁻⁵	K	U · 10 ⁻⁵
АО-15	Дунит	0,6±0,1	3,75±0,5	0,08±0,05	2,5±0,4
АО-16	»	2,3±0,4	7,4±0,6	0,16±0,05	9,4±1,6
АО-5	Перидотит	0,4±0,2	2,9±0,4	0,44±0,05	1,6±0,8
АО-5А	То же	3,1±0,1	11,9±0,7	0,22±0,05	12,7±0,4
АО-2	Эклогит	1,1±0,1	6,5±0,4	0,24±0,08	4,5±0,4
АО-3	»	0,2±0,1	1,52±0,3	0,05±0,05	0,8±0,4
АО-1	Шпинелевый энстатит	1,0±0,2	4,0±0,2	0,11±0,05	4,1±0,8

Проведенные нами определения (табл. 1) согласуются с последними данными. Необходимо подчеркнуть, что исследовались абсолютно свежие образцы без всяких вторичных минералов. Такие образцы редко встречаются, в Сибири их много только в трубке «Обнаженная». В Африке свежие эклогиты встречаются еще реже из-за большой глубины зоны выветривания. Мы получили содержание урана в мантийных эклогитах порядка нескольких сотых долей $г/т$. На основании этого значения и данных Ловеринга, Моргана и Тилтона получено среднее содержание урана в мантийных эклогитах, равное 0,042 $г/т$.

Обломки мантийных пород, изучаемых нами, по своему химическому составу очень близки к каменным метеоритам.

Акад. А. П. Виноградовым в свое время была предложена хондритовая модель земного шара. По этой гипотезе земная кора возникла в результате дифференциации и зонной плавки хондрита. Хондритовая модель достаточно стройна, даже в деталях. Действительно, состав мантийных эклогитов и пироповых перидотитов очень близок, а во многих случаях подобен составу ахондритов. Между породообразующими минералами уран распределяется вполне

закономерно и зависимости от условий кристаллизации (температуры и давления), а также от особенностей кристаллохимического строения минерала-хозяина.

При равновесном соотношении минералов содержание урана закономерно уменьшается в ряду: гранит > шпинель > моноклинный пироксен > ромбический пироксен > оливин > плагиоклаз.

При одинаковых условиях кристаллизации в паре гранат — моноклинный пироксен уран распределяется равновесно и обнаруживает коррелятивную связь, т. е. уран имеет постоянную константу распределения при постоянных температуре и давлении.

Расчет баланса вещества при реакциях эволюции показывает, что по сравнению с количеством вынесенного кремнезема и щелочей количество вынесенного урана относительно невелико. На основании этого можно сделать вывод, что кислые магмы или растворы, генерированные в верхней мантии, бедны ураном, что должно их отличать от палингенных магм, генерированных в самой коре.

Картина вертикального распределения урана в земной коре и верхней мантии такова, что с глубиной содержание урана прогрессивно убывает. Такие крупные подразделения, как гранито-гнейсовый слой с породами амфиболитовой фации, гранулит-базитовый слой и эволютивный слой верхней мантии, отличаются друг от друга содержанием урана на целый порядок от единиц г/т урана вверху и до сотых долей г/т урана в эволютивном слое верхней мантии.

В заключение необходимо отметить, что в связи с новыми цифрами содержания урана следует уточнить цифры средних кларковых содержаний в мантийных эволюитах, которые в настоящее время основываются главным образом на данных Хайера и, по-видимому, завышены.

Использование прецизионной гамма-спектрометрии позволило впервые в Советском Союзе изучить распределение урана и тория в кимберлитовом цементе различных трубок взрыва Якутии и оценить их практическое значение.

Высокое содержание радиоактивных элементов в кимберлитах по сравнению с траппами (табл. 2) и резкое различие характеристик спектра γ -излучения открывают широкие возможности для применения гамма-спектрометрического метода как при поисках, так и при разведке алмазоносных кимберлитов.

Среднее содержание радиоактивных элементов в различных кимберлитах Якутии и траппах

Таблица 2

Тип кимберлита	Концентрация, вес. %			Th/U
	Th · 10 ⁻⁴	U · 10 ⁻⁴	K	
Алмазоносные кимберлиты	8,43	2,63	0,13	3,2
Неалмазоносные кимберлиты	19,37	3,70	0,8	5,2
Траппы (по данным В. И. Гоньшаковой и В. Л. Масайтиса)	0,5—1,4	0,6—0,8	0,3	10,0

Изотопные методы в гидрологии и гидрогеологии. Как указывал акад. В. И. Вернадский, вода является ценнейшим полезным ископаемым на Земле. Несмотря на то что более 70% поверхности земного шара покрыто водами Мирового океана, а в земной коре содержится около 400 млн. км³ свободной и связанной воды, во многих странах мира постоянно не хватает воды, а в аридных областях из-за ее недостатка сдерживается развитие сельского хозяйства и промышленности.

При изучении кругооборота воды в природе в масштабе всей нашей планеты находят применение радиоактивные и стабильные изотопы. Для решения этой задачи был найден весьма эффективный метод, основанный на использовании природных космогенных изотопов — трития, C¹⁴, дейтерия и кислорода, три из которых являются компонентами молекул самой воды. К настоящему времени найдены общие закономерности распределения указанных изотопов в природных водах на планете, оценены сезонные вариации изотопного состава воды и определяющие их факторы, ведется систематический сбор фактических данных об изотопном составе специально созданной сетью гидрологических станций. Эту проблему, носящую глобальный, планетарный характер, нельзя решить только в одной стране, поэтому усилия ученых многих стран мира объединены под эгидой ЮНЕСКО — МАГАТЭ, исследования проводятся в рамках проходящего сейчас Международного гидрологического десятилетия. Советский Союз активно участвует в исследованиях, которые проводятся в этом направлении.

С помощью природных радиоактивных и стабильных изотопов изучаются происхождение

атмосферной влаги, динамика озер и водохранилищ, взаимосвязь поверхностных и подземных вод, условия водопритока в шахты и открытые горные выработки, открытые потоки и русловые процессы и др.

Следует остановиться на весьма важных проблемах гидрогеологии, связанных с изучением генезиса и возраста подземных вод. В настоящее время многие ученые мира, в том числе и СССР, проводят исследования по изучению стабильных изотопов водорода (H^1 , H^2) и кислорода (O^{16} , O^{17} , O^{18}) в различных природных водах с целью установления эффективных методов идентификации реликтовых и магматических вод. Выявление этих процессов по изотопному составу воды и их геохимическая интерпретация помогают решить сложные вопросы, связанные с оценкой условий формирования подземных вод.

При решении гидрогеологических задач широко применяется метод, основанный на определении возраста поверхностных и подземных вод по измерению содержания космогенного трития и C^{14} . Учитывая период полураспада этих изотопов, с помощью их можно проводить датирование природных вод: по тритию до 50 лет и по C^{14} до 40 000 лет. Исследуются возможности использования для гидрогеохронологии Si^{32} с пределом датирования до 3000 лет, Cl^{36} — до 2 млн. лет, Be^{10} — до 10 млн. лет, I^{129} — до 100 млн. лет.

Кроме использования природных радиоактивных и стабильных изотопов в научных исследованиях и практике гидрологических и гидрогеологических работ получили развитие методы, основанные на применении радиоактивных индикаторов и ядерных излучений.

В СССР первое удачное опытно-промышленное применение трития для изучения движения жидкости в нефтяном пласте между скважинами было осуществлено на Северном Кавказе еще в 1956—1957 гг. В дальнейшем предложенный метод был применен в нефтедобывающей промышленности на Северном Кавказе и Татарской АССР.

Особого внимания заслуживают исследования, проведенные ГрозНИИ по использованию трития для установления гидродинамической связи нефтеносных зон мощных массивов трещинных коллекторов (толщиной 300 м) месторождений Северного Кавказа, что сопровождалось значительным экономическим эффектом. В результате этих исследований установлена сообщаемость отдельных продуктивных нефтеносных зон мощной толщи трещинных

коллекторов. Полученные материалы были использованы при составлении проектов разработок залежей. Сделан общий вывод, что все залежи типа изучаемых с гидродинамической точки зрения представляют собой единые резервуары и могут разрабатываться одной сеткой скважин. Выполненная работа по своим масштабам является одной из наиболее крупных в мировой практике использования для этой цели радиоактивных изотопов.

На основании выполненных опытных работ можно сделать вывод о перспективности использования естественного трития для установления источников обводнения шахт и горных сооружений и выработок, а также при изучении динамики подземных вод и оценке степени водообмена грунтовых вод.

Для использования другого изотопа водорода — дейтерия — необходимо решить вопросы происхождения подземных и поверхностных вод и миграции их в толще земной коры. Определение концентрации дейтерия производилось фотонейтронным методом.

Изотопное отношение водород — дейтерий в природных водах различного типа рассматривается как индикатор интенсивности водообмена в земной коре и атмосфере в процессе общего гидрологического цикла планеты. При этом решающее влияние на распределение дейтерия в природных водах (в том числе подземных) оказывают испарение и конденсация в процессе общего кругооборота вод Земли. Проведенные исследования в артезианских бассейнах Азово-Кубанского прогиба, Днепрово-Донецкой впадине и Иркутском амфитеатре показали, что вариации изотопного состава водорода подземных вод, отобранных из водовмещающих отложений различного возраста разных по геологическому строению артезианских бассейнов, не выходит за предел изменения содержания дейтерия в поверхностных водах. В предположении постоянства изотопного состава водорода в Мировом океане и стационарности процессов кругооборота природных вод на протяжении длительного геологического времени (условно принят период до 500 млн. лет) интервал значений концентраций дейтерия в подземных водах можно объяснить образованием подземных вод из двух генетически различных типов вод, имеющих различный изотопный состав водорода.

Радиоизотопные методы исследований в инженерной геологии. В Советском Союзе ежегодно бурят более 5 млн. *пог. м* мелких (15—25 м) скважин и более 500 млн. *пог. м* шурфов для

инженерно-геологических целей. Только по Министерству геологии СССР на предстоящее пятилетие запланировано покрыть комплексной гидрогеологической съемкой территорию площадью до 1 млн. км² и специализированной съемкой масштаба 1 : 50 000 — 1 : 25 000 территорию площадью 300 тыс. км². При проведении этих работ, а также научных исследований в области инженерной геологии широко применяются следующие методы: 1) для определения физических свойств пород — три метода, основанные на использовании нейтронного и γ -излучений; 2) для изучения геологических разрезов — методы радиоактивного каротажа; 3) для определения фильтрационных свойств пород — методы радиоактивных индикаторов; 4) при исследовании геодинамических процессов — радиоизотопные методы изучения динамики влаги в зоне аэрации; 5) для картирования поверхностных отложений — методы аэро- и наземной гамма-съемки.

Заслуживают внимания разработки, связанные с применением методов радиоактивного каротажа (гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж), используемых без предварительной проходки скважин до глубины 30 м при проведении инженерно-геологических съемок и изысканий под объекты массового строительства. Совмещение проходки скважин с проведением радиоактивных каротажей путем вдавливания каротажного зонда с помощью специальной установки позволило получить большой технико-экономический и методологический эффект при инженерно-геологическом изучении разрезов рыхлых отложений. В настоящее время наша промышленность приступила к серийному выпуску специально созданной пенетрационно-каротажной станции (СПК). Эта станция является первой в нашей стране и за рубежом комплексной высокопроизводительной установкой, в которой осуществлено совмещение радиоактивных каротажей и статистического зондирования. В результате с помощью СПК оказалось возможным получать полную информацию о физико-механических свойствах и литологическом строении разреза рыхлых отложений без бурения скважин и отбора образцов пород для лабораторных анализов.

Используя тот же принцип погружения каротажного зонда вдавливанием, удалось решить еще одну не менее важную задачу инженерной геологии, связанную с исследованием строения и получением инженерно-геологических свойств рыхлых донных отложений на морских аквато-

риях. Сейчас ведутся опытно-конструкторские работы по созданию подводной СПК.

Следует отметить, что в нашей стране впервые был применен гамма-плотномер, основанный на использовании рассеянного излучения, для определения плотности лунной поверхности. Этим плотномером была оснащена советская космическая станция «Луна-13».

Ядерная геофизика

Ядерная геофизика как научное направление, оформившееся за последние 15 лет, открывает большие возможности по коренному усовершенствованию методики поисков и разведки полезных ископаемых и технологии разработки месторождений.

В отличие от других геофизических методов изучения геологических разрезов скважин методы ядерной геофизики позволяют в принципе решать основную задачу геологического познания недр — определение вещественного состава горных пород, а следовательно, и прямое выявление многих полезных ископаемых.

Возможность решения этой задачи, как известно, базируется на различии свойств ядер элементов, встречающихся в природе: сечений рассеяния и поглощения нейтронов или γ -квантов различных энергий; энергий γ -излучения радиационного захвата; периодов полураспада возникающих радиоактивных изотопов и энергий γ -излучения распада последних.

Вследствие многообразия ядерных свойств и достаточно широкого диапазона их изменения ядерные методы позволяют не только выявлять полезное ископаемое, но нередко и устанавливать довольно детально его вещественный состав.

Указанные выше возможности ядерных методов, а также возможность их применения для решения других задач промысловой геофизики (например, при изучении литологического состава и коллекторских свойств нефте- и газовмещающих пород, оценки их нефтенасыщенности, познания технического состояния скважин) ставят эти методы на одно из первых мест среди других геофизических методов изучения геологического разреза и технического состояния скважин.

В результате выполненных научно-исследовательских работ и успешного их применения геологоразведочная практика, нефтедобывающая и газовая промышленность получила на вооружение способы, позволяющие более детально изучить разрезы скважин, в том числе

карбонатных пород, исследование которых электрометрическими методами недостаточно эффективно. Между тем изучение карбонатных пород крайне необходимо, так как к ним, как известно, приурочена почти половина всех мировых запасов нефти и газа.

С помощью ядерных методов впервые была решена задача определения положения водо-нефтяного контакта в пластах с минерализованными водами. В результате этого нефтяная промышленность получила надежный способ постоянного контроля за процессом разработки нефтяных месторождений. Созданы методы контроля разработки месторождений со слабо-минерализованными водами и успешно разрабатываются ядерные методы контроля за перемещением контактов нефть — вода при пресных водах.

Ядерные методы позволили создать эффективный способ изучения процесса закачки и извлечения газа на всех стадиях сооружения и эксплуатации подземных газохранилищ. Использование методов ядерной геофизики в комплексе с гидродинамическими исследованиями позволило пересмотреть емкость Щелковского подземного хранилища и увеличить ее более чем в три раза.

Определились большие возможности ядерных методов в управлении процессом разработки газовых месторождений. Использование ядерных методов сопровождается крупным экономическим эффектом.

За истекшие годы ядерная геофизика получила на вооружение нейтронные и нейтронные гамма-методы, гамма-гамма-методы, методы нейтронного активационного анализа и импульсные нейтронные и нейтронные гамма-методы, используемые при исследованиях нефтяных и газовых скважин. В последние годы освоены и выпускаются серийно отечественной промышленностью малогабаритные (скважинные) генераторы нейтронов. Успешно ведутся исследования по созданию скважинных генераторов γ -квантов.

В настоящее время в СССР методы ядерной геофизики начинают широко использоваться при поисках, разведке и разработке месторождений рудных полезных ископаемых, и нерудного сырья. С их помощью представляется возможным решать следующие задачи: 1) расчленение пород, оконтуривание рудных зон, определение мощности рудных тел и содержания отдельных элементов в разрезах поисково-разведочных и эксплуатационных скважин; 2) определение элементного состава горных

пород и руд по стенкам горных выработок, на выходах коренных пород и в наносах; 3) проведение экспресс-анализа различного рода проб и образцов керна. При решении этих задач наибольшее распространение получили методы, использующие эффекты взаимодействия γ -квантов и нейтронов с веществом горных пород и руд. В качестве источников этих излучений обычно используются радиоактивные изотопы. В условиях стационарных лабораторий начинают применяться управляемые источники излучений. В качестве источников нейтронного излучения в геофизической практике используются ампульные полониево-бериллиевые источники, а в последнее время и полониево-борные. В гамма-методах наиболее широко используются серийно выпускаемые источники Se^{75} , Tl^{170} , Cs^{137} , Co^{60} , Sb^{124} , Tl^{204} , Pm^{147} , циркониево-третиевые мишени. В последние годы при изучении вещественного состава горных пород и руд все шире применяются радиоактивные изотопы Co^{57} , Cd^{109} , Fe^{55} , Sn^{119m} , W^{181} и др.

Наиболее широкое применение на практике получили фотонейтронный метод, радиоизотопный рентгенофлуоресцентный метод, гамма-гамма-метод, нейтронно-активационный и нейтронный гамма- и нейтронно-абсорбционный методы.

Фотонейтронный метод определения бериллия, основанный на использовании реакции (γ, n), является одним из наиболее результативных методов ядерной геофизики. Этот метод, отличающийся высокой избирательностью, чувствительностью и глубиной, широко применяется при опробовании горных пород и руд, при разведке и отработке месторождений бериллия, а также при площадных поисково-съемочных работах. Данные фотонейтронного каротажа используются для подсчета запасов бериллия.

Радиоизотопный рентгенофлуоресцентный или рентгенорадиометрический метод основан на возбуждении характеристического рентгеновского излучения, энергия которого специфична для каждого элемента. За последнее пятилетие метод успешно испытан при каротаже поисково-разведочных и подземных эксплуатационно-разведочных скважин на свинец, ртуть, барий, сурьму, олово, вольфрам. Получены положительные результаты по применению этого метода для опробования горных выработок и орбитой горной массы на свинец, сурьму, олово, медь, цинк, марганец, железо, титан, цирконий.

В настоящее время в СССР рентгенорадиометрический каротаж применяется в опытно-производственной практике для определения в поисково-разведочных скважинах свинца, бария, вольфрама и олова.

Гамма-гамма-метод, существующий уже более 10 лет, применяется в интегральной модификации почти повсеместно при оперативном решении задач, связанных с оконтуриванием рудных тел по скважинам и оценкой содержания в рудах железа, свинца, сурьмы и других металлов. Этот метод используется также для опробования стенок горных выработок на свинец, для опробования отбитой горной массы на свинец, железо, сурьму на карьерах и в подземных условиях при выпуске ее из «магатинов».

Нейтронно-активационный метод наиболее целесообразно использовать при изучении элементного состава горных пород и руд в скважинах. Активационный каротаж успешно применяется для выделения в разрезах скважин бокситов, медных и марганцевых руд, флюорита, а в отдельных случаях — и для количественной оценки содержания фтора, алюминия, кремния, меди и марганца. Наиболее эффективно применение этого метода на месторождениях плавикового шпата, где он в настоящее время используется для подсчета запасов флюорита. Установлена возможность использования активационного каротажа для определения степени окварцованности пород по величине их силикатного модуля, что имеет важное значение для оценки золотоносности пород. Этот метод успешно начали применять на фосфоритовых месторождениях, что позволяет выделить в разрезе скважин фосфоритовую серию, дифференцировать породы серии по содержанию фосфора (по корреляции с фтором), кремния, алюминия и кальция, надежно идентифицировать в разрезе промышленные пласты и устанавливать их технологические свойства.

В практике поисков и разведки при исследовании скважин широкое распространение

получили также методы *нейтронной абсорбиметрии* при выделении и оценке содержания элементов с аномально высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов (бор, ртуть, марганец, редкие земли). В последние годы проведены исследования по спектрометрии захватного γ -излучения, возникающего в результате радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами породообразующих элементов. Благоприятными объектами для применения метода спектрометрии захватного γ -излучения являются руды никеля, хрома, меди, серы и других элементов.

В настоящее время разработана и опробована методика определения в скважинах никеля для никелевых месторождений коры выветривания, решена задача выделения в скважинах хромитовых руд, успешно проводятся исследования по отработке методики определения в поисково-разведочных скважинах серы.

Для решения различных прикладных задач ядерной геофизики успешно используются новейшие достижения ядерной физики. Наиболее ярким примером может служить использование недавно открытого эффекта Мёссбауэра. На использовании этого эффекта основан метод ядерной резонансной флюоресценции, весьма перспективный для прямых определений олова, а также железа в пробах и горных выработках.

Несмотря на то что этот метод в СССР начал разрабатываться сравнительно недавно, в настоящее время он уже подготовлен для внедрения на геологоразведочных и горнодобывающих предприятиях.

Внедрение методов ядерной геофизики, особенно на горнодобывающих предприятиях, сопровождается значительными экономическим и техническим эффектами благодаря резкому повышению надежности и оперативности опробования и сокращению трудоемких и дорогостоящих работ по отбору, обработке проб и при их последующем химическом анализе.

Итоги использования изотопов и ядерных излучений в исследованиях по сельскому хозяйству

С. В. НЕРПИН, В. М. ПРОХОРОВ, В. Н. САВИН

Замечательные достижения физики открыли широкие возможности применения изотопов и излучения в сельском хозяйстве.

История применения ионизирующих излучений в сельском хозяйстве в нашей стране

насчитывает несколько десятков лет. В 1925 г. впервые в мире советскими учеными Г. А. Надсоном и Г. С. Филипповым была показана возможность получения индуцированных мутаций, вызванных облучением ионизирующими