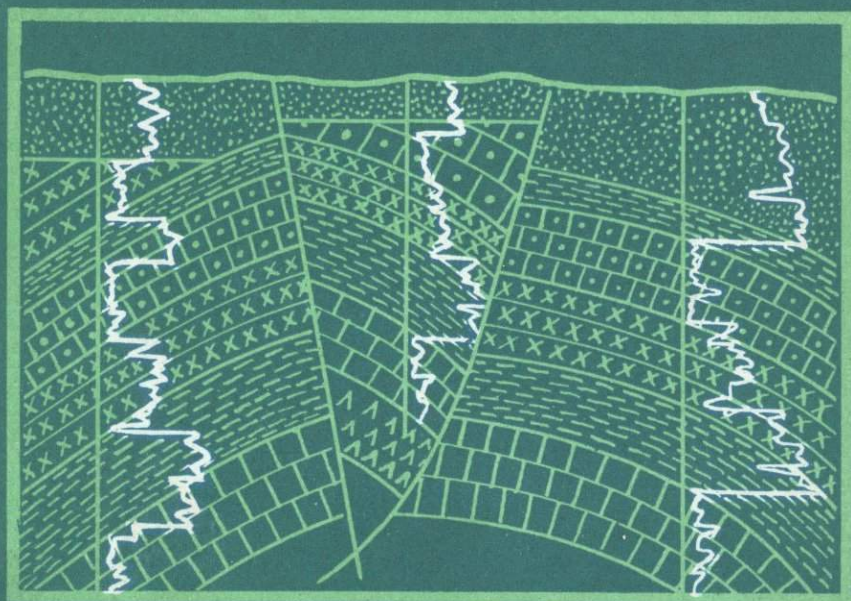


Т. Д. ИЛЬИНА

РАЗВИТИЕ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ В СССР



ИЗДАТЕЛЬСТВО • НАУКА •

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

Т.Д.ИЛЬИНА

РАЗВИТИЕ
ЯДЕРНОЙ
ГЕОФИЗИКИ
В СССР

1917 – 1960 гг.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1978



2825

И л ь и н а Т.Д. Развитие ядерной геофизики в СССР. 1917–1960 гг.
М., "Наука", 1978.

В книге изложена история приложения ядерной физики в геологии, начиная со времени открытия явления радиоактивности до современного этапа развития ядерно-геофизического направления в исследованиях вещественного состава горных пород.

На основании литературных, фондовых и архивных материалов в книге впервые подробно показаны становление и развитие ядерной геофизики в СССР, внедрение приборов и аппаратуры, а также значение сложившихся организационных форм научного сотрудничества. Основное внимание уделено истории изучения радиоактивности нефтяных месторождений, поскольку именно в нефтяной промышленности начали впервые наиболее широко применяться достижения ядерной физики.

Книга представляет интерес для геофизиков, геологов и историков науки.

Табл. 4, ил. 15, список лит. 693 назв.

Ответственный редактор

доктор физико-математических наук Л.С. Полак

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой первую монографию по истории отечественной ядерной геофизики более чем за полувековой период со времени открытия явления радиоактивности до становления ядерно-физического направления в исследованиях вещественного состава горных пород нефтяных месторождений. Ее автор является участником и очевидцем многих событий в этой области. В книге показано значение первых работ по определению радиоактивности минералов русскими учеными, которые понимали важность открытия явления радиоактивности и ее возможное практическое использование. Рассмотрены предложенные еще в 20-х годах методы использования радиоактивных излучений для разведки полезных ископаемых — радиоактивных минералов, руд, нефти.

Внедрение ядерно-физических методов в нефтяную промышленность способствовало восстановлению разрушенных войной старых скважин и ускорило освоение новых нефтедобывающих районов. Особенно эффективным оказались эти методы при доразведке нефтяных месторождений и решении народнохозяйственной проблемы контроля за разработкой крупнейших месторождений с искусственным воздействием на пласт. Подчеркнута связь теоретических и экспериментальных исследований с разработкой приборов для промышленного использования.

Применение в разведке и исследованиях нефтяных месторождений радиоактивных излучений было первым и наиболее широким использованием достижений ядерной физики в промышленности. Благодаря универсальности ядерно-физических методов исследования нефтяных месторождений, возможности проведения с их помощью дистанционного элементного и количественного анализов вещества любых горных пород эти методы постепенно находят применение в самых разнообразных геологических исследованиях и при разведке различных полезных ископаемых.

Ядерная геофизика, используя достижения ядерной физики, стремительно развивается во многих направлениях и являет

собой яркий пример использования атомной энергии в мирных целях.

Труд Т.Д. Ильиной, в котором освещаются этапы становления ядерной геофизики в нашей стране, представляет несомненный вклад в историю науки и соответствует установлению приоритета советских ученых в этой области.

В.В. Федынский

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная геофизика в широком смысле понимается как наука о радиоактивных явлениях, искусственных и естественных радиационных полях Земли. С помощью ее методов впервые появилась возможность при измерениях с земной поверхности устанавливать не только физические параметры погребенных пород, но и их элементный состав, характер насыщающей поры жидкости, а также изучать последовательность некоторых сложных геологических процессов, превращения земного вещества, внутреннее строение и развитие земной коры. Ядерная геофизика дает возможность получать важные теоретические и экспериментальные данные о взаимодействии Земли с окружающим космическим пространством, метеорной материей и планетами.

Решение тех или иных практических задач требовало на отдельных этапах развития ядерной геофизики усиления определенных теоретических и экспериментальных направлений, которые со временем приобретали самостоятельное значение. В настоящее время к ядерной геофизике в широком смысле можно отнести радиогеохронологию, ядерную гидрофизику, т.е. применение радиоактивных методов к решению задач гидрологии суши и океанологии, ядерную вулканологию, ядерную геокосмологию, радиометеорологию, разведочную и нефтепромысловую ядерную геофизику, называемую часто просто ядерной геофизикой.

Возникновение радиогеохронологии можно отнести к 1902 г., когда П. Кюри впервые высказал мысль о возможности использования радиоактивного распада для определения возраста минералов и руд, а Э. Резерфорд и Ф. Содди создали основы теории и установили постоянную времени радиоактивного распада. Позднее Б. Болтвуд (Boltwood, 1905) показал, что свинец и гелий являются неизбежными спутниками и продуктами распада урана. Два года спустя он по скоплению свинца в неизменившейся урановой руде определил ее абсолютный возраст, оказавшийся порядка 1320 млн. лет. Эти данные противоречили существовавшим в то время представлениям геологов и физиков о времени, необходимом для формирования осадочных пород, аккумуляции солей в океанах и эволюции современной жизни. Однако с позиций учения о радиоактивности полученная величина была вполне оправданной, поскольку в термодинамических условиях земной коры на всем протяжении геологической истории ход ядерных процессов оставался практически постоянным. Даже для самого ничтожного его изменения потребовалось бы приложить колоссальную энергию, существующую только в звездной стадии развития

небесных тел. Накопление знаний об изотопном составе элементов, возможность раздельного измерения их количеств, например, изотопов свинца различного происхождения, позволили определить возраст не только урановых, но и ториевых минералов, а определение возраста отдельных минералов в свою очередь послужило основанием для установления абсолютного возраста Земли.

Основа ядерной гидрофизики океана была заложена благодаря исследованиям морских осадков, проведенным Дж. Джоли в 1908 г., и установлению повышенной радиоактивности глубоководных отложений по сравнению с породами земной коры. Особенно интенсивно исследования радиоактивности морских илов, глубоководных конкреций и морской воды проводятся с 50-х годов. Если исследования радиоактивности осадков и конкреций помогали в понимании геологических процессов, то изучение радиоактивности морской воды является вынужденной мерой защиты здоровья человека. Дело в том, что в связи с осаждением продуктов ядерных взрывов и захоронением отходов атомного производства резко повысилась радиоактивность некоторых рек и морей. Выявилась срочная необходимость разработки мер борьбы против радиоактивного загрязнения водной среды (Нелепо, 1970).

Зарождение ядерной вулканологии связано с определениями содержания радия и тория в лаве Везувия Дж. Джоли в 1909 г. Впоследствии учеными Японии, Италии, СССР, Норвегии, США и других стран были изучены изотопы многих элементов вулканических пород (Чердынцев, 1973). Оформившаяся в последние годы ядерная вулканология изучает поведение радиоактивных элементов и изотопов при современных вулканических процессах.

Благодаря успехам космической техники удалось получить образцы околоземного вещества и лунных пород. Их исследования показали перспективность для геологии еще одного только зарождающегося направления — ядерной геокосмологии, или космогеологии.

В стадии формирования находятся и другие направления ядерной геофизики, потребность в которых увеличивается по мере развития ее практического приложения. К таким направлениям можно отнести, например, радиометеорологию, изучающую изменение изотопного состава воздушной среды.

Отдельные направления ядерной геофизики начали самостоятельно развиваться, используя в начальный период ядерно-геофизические методы, разработанные для исследования горных пород в нефтяных скважинах.

Цель настоящей книги — показать, как зарождались методы ядерной геофизики в нашей стране, как создавались первые способы обследования геологических коллекций и поисков радиоактивных минералов по регистрации естественного излучения, как с помощью методов ядерной геофизики изучалась радиоактивность глубинных вод и были сделаны первые шаги к пониманию хода некоторых геологических процессов.

Еще в годы первых пятилеток практические потребности народного хозяйства нашей страны в новых методах разведки и исследований нефтяных месторождений не только стимулировали ход научных работ в области ядерной физики, но и направили внимание ученых на решение опреде-

ленных задач, связанных с геологией нефти. В то время нефтепромысловая геология в больших масштабах занималась изучением литологического разреза месторождений. Различные геофизические методы разведки на нефть начали усиленно разрабатываться с конца 20-х годов. Для их развития существенное значение имели созданные в первые годы Советской власти крупные научно-исследовательские физические институты в Москве и Ленинграде, обеспечившие проведение соответствующих экспериментальных и теоретических работ на высоком научном уровне. "Дальновидное объединение теоретических высот с конкретными задачами, — заявил в 1944 г. на общем собрании Академии наук СССР академик С.И. Вавилов, — неуклонно проводившееся в советских научных физических институтах, в полной мере оправдало себя . . ."¹ На помощь нефтяникам пришли сначала ученые ленинградского Государственного радиового института, а затем и московских институтов; в рассмотрении общих вопросов геофизической разведки принял участие и Ученый совет при Президенте АН СССР.

Перед всеми геофизическими исследованиями земной коры всегда стояла задача однозначной геологической интерпретации полученных физических параметров. Задача эта весьма трудоемкая, поэтому до настоящего времени ни один из геофизических методов нельзя считать универсальным. На практике обычно применяют комплекс методов, оптимальный для данного района.

Создание радиоактивных, особенно нейтронных методов исследования горных пород в их естественном залегании существенно изменило положение в геофизической разведке полезных ископаемых. Путем измерения сначала естественной радиоактивности горных пород, а затем их нейтронных свойств стало возможным непосредственно определять физические параметры геологических образований. Именно в этом и состояло преимущество радиоактивных методов перед другими, именно это и привлекало к ним геологов. Уже в самом начале создания первого метода радиоактивного каротажа была выяснена принципиальная возможность его применения для установления состава пород и определения степени водо- и нефтенасыщенности пластов, причем измерения могли проводиться в действующих, закрепленных стальными трубами скважинах, не доступных никаким другим геофизическим методам измерений. Со временем было создано большое количество различных ядерно-геофизических методов, сочетания которых давали возможность во многих случаях определять состав горных пород на больших глубинах без подъема образцов на земную поверхность. Универсальность ядерно-геофизических методов исследования месторождений полезных ископаемых, возможность дистанционного элементного и количественного анализов вещества любых горных пород, а также установления общих закономерностей протекающих процессов обусловили их интенсивное развитие.

Постепенно методы ядерной физики нашли широкое применение в самых разнообразных геологических исследованиях, в том числе при разведке любых полезных ископаемых.

¹ Вавилов С.И. Ленин и современная физика. — Вестн. АН СССР, 1944, № 3, с. 33–49.

В настоящей работе использованы не только опубликованные, но и архивные, и фондовые материалы, авторские свидетельства. Обсуждение отдельных глав и работы в целом непосредственными участниками создания ядерной геофизики существенно помогло в подготовке книги. Автор приносит глубокую благодарность академику Г.Н. Флерову, академику Б.М. Понтекорво, члену-корреспонденту АН СССР В.В. Федынскому, доктору геол.-мин. наук Ф.А. Алексееву, канд. техн. наук Д.Ф. Беспалову, доктору геол.-мин. наук Б.П. Высоцкому, доктору физ.-мат. наук Б.Г. Ерозолимскому, доктору техн. наук В.М. Запорожцу, канд. геогр. наук И.М. Забелину, канд. техн. наук С.А. Кантору, доктору техн. наук Г.В. Горшкову, доктору техн. наук В.Н. Дахнову, доктору физ.-мат. наук Я.Г. Дорфману, канд. техн. наук Д.А. Кожевникову, доктору техн. наук Д.И. Лейпунской, канд. физ.-мат. наук Н.М. Лятковской, канд. геогр. наук А.Ф. Плахотнику, доктору физ.-мат. наук Л.С. Полаку, канд. физ.-мат. наук А.Л. Поляченко, канд. техн. наук Р.А. Резванову, канд. геол.-минер. наук Д.М. Сребродольскому, доктору хим. наук Д.Н. Трифонову, доктору техн. наук А.И. Холину, доктору геогр. наук И.А. Федосееву, доктору физ.-мат. наук Ю.С. Шимилевичу и многим другим специалистам в области ядерной геофизики и истории науки.

ЗАРОЖДЕНИЕ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ
(1920—1930 гг.)

Минералы, содержащие уран и торий, были известны в России еще в первой половине XIX в. Это самарскит, обнаруженный Г. Розе на Урале в 1839 г., чевкинит, монацит, эцинит и другие. Подробные описания тория и его соединений были опубликованы в первой половине XIX в. во всех курсах минералогии, в том числе и академиком Н. Кокшаровым в России. Были известны находки минералов с небольшим содержанием (около 17—20%) урановых соединений. О минералах, более богатых ураном, таких, как халколит, известный под названием медный уранат или урановая слюда, упоминалось как о "величайшей редкости", и они имелись только в некоторых частных коллекциях (Кокшаров, 1862). Находки халколита были известны на Волк-острове на Онежском озере (Записки . . . , 1900); в Забайкалье; например, в районе р. Бымтрак, также были найдены урановые минералы, в частности — фитинофит, а в притоках р. Иркут — ортит (Еремеев, 1873).

К началу XX в. было известно более 60 различных урановых минералов, что по общему количеству превышало минералы таких распространенных элементов, как олово, цинк, свинец, серебро, золото, кобальт, никель и др. (Вернадский, 1914). Несмотря на это, их геохимия не была изучена. Минералогия в XIX в. только начинала исследования некоторых геохимических процессов, происходящих в земной коре. Но изучению геохимии радиоактивных минералов не уделялось внимания, она даже не входила в курсы университетского преподавания; многие минералоги всю свою научную жизнь могли никогда их не увидеть. Область их изучения, являвшаяся труднейшей и самой запутанной в минералогии, все время оставалась в стороне от очередного научного исследования (Вернадский, 1935). Кроме того, изучение геохимии радиоактивных элементов осложнялось еще тем, что каждый радиоактивный химический элемент имеет свой количественно определенный, тогда еще неизвестный ход распада, независимый от окружающей обстановки (термодинамических, электромагнитных, гравиметрических и других условий). Поэтому геологи по существу оказались неподготовленными к пониманию явлений радиоактивности в области химии земной коры, минералогии радиоактивных элементов и т.д. (Вернадский, 1911).

Только после открытия явления радиоактивности внимание геологов было привлечено к поискам радиоактивных минералов и исследованиям их свойств. При просмотре образцов геологических коллекций начали производиться в некоторых случаях даже специальные химические ана-

лизы на радиоактивные элементы. Такой анализ образцов из района Тюя-Муона был произведен И.А. Антиповым, благодаря чему там было открыто первое в России промышленное месторождение радия.

Открытие радиоактивности урановых минералов "по существу было открытием не только физическим, но и открытием геологическим и даже астрономическим ... Немедленно мир минералов был охвачен в этом направлении работой физиков, минералогов и химиков" (Вернадский, 1939, с. 218). В России многие физики и химики до конца первой мировой войны не имели возможности активно участвовать в исследованиях по радиоактивности и химии радиоэлементов. В физических лабораториях высших учебных заведений, за редким исключением, не было ни радия, ни урана, и приобрести их было трудно из-за дороговизны радиоактивных элементов на мировом рынке и ничтожно малых ассигнований на научную работу в царской России. Однако ученые не могли оставаться в стороне от нового направления в науке, и еще до 1917 г. ими были сделаны важные шаги в развитии физических и геологических аспектов открытия явления радиоактивности.

В русских научных и популярных изданиях начала века систематически публиковались сообщения и обзоры о результатах исследований в области радиоактивности.

Интерес к радиоактивным минералам особенно возрос после исследований эманации радия. В. Рамзай экспериментально доказал существование радиоактивного распада, предсказанного Э. Резерфордом и Ф. Содди. Радиоактивный распад радия, его превращение в эманацию радия и затем в конечном счете в свинец означал существование в природе непрерывного процесса превращения радиоактивных веществ.

И хотя работы В. Рамзая, заявил геолог академик А.П. Карпинский, открывая 26 октября 1904 г. заседание Минералогического общества, имеют "ближайшее отношение к химии и физике, но радиоактивные вещества, открытые в минерале урана (урановой руде), представляют столь всеобъемлющий интерес, что изучение их в области знания, разработке которого посвящена деятельность Минералогического общества, открывает, можно сказать, новые горизонты" (Записки . . . , 1905, с. 59).

В то время еще не было понятно, какое влияние мог оказать радиоактивный распад на геологические процессы, как можно использовать мощную, неизвестную ранее атомную энергию радиоактивного распада и т.п. Однако глубокое понимание важных последствий открытия явления радиоактивности для развития науки и будущего всего человечества дало основание В.И. Вернадскому поставить вопрос об организации систематических исследований радиоактивных минералов в России и составлении мировой карты радиоактивных руд.

Организованная Академией наук Радиевая комиссия только после Великой Октябрьской социалистической революции смогла начать широкие систематические исследования и сбор необходимых материалов. Перед Радиевой комиссией была поставлена также конкретная задача выявления месторождений радиоактивных руд и минералов, которые

смогли бы обеспечить промышленную добычу радия, урана и других радиоактивных элементов, необходимых для научных исследований и частично для обеспечения нужд промышленности того времени (например, для изготовления светящихся составов, достаточно широко применявшихся в приборостроении).

Разведка месторождений радиоактивных руд и составление карты оказались сложными и трудоемкими, поскольку накопившиеся к тому времени материалы о содержании радиоактивных элементов в горных породах были весьма скудными. Трудности заключались в необходимости отбора и анализа многочисленных случайных указаний о количестве радиоактивных элементов в породах, определении их возраста, в создании методики и вычислении среднего количества радиоактивных элементов в земной коре и конкретных геологических формациях и т.п. Проходившее в Москве 26–28 октября 1918 г. совещание физиков признало желательными объединение усилий в области изучения радиоактивности, а также подготовку кадров радиологов на специально организованных кафедрах в университетах Москвы и Петербурга (Организация науки ..., 1968).

Доводы в пользу объединения научных сил и средств в деле исследований радиоактивности и изыскания новых источников добычи радия, высказанные на совещании физиков, были достаточно убедительными и поддерживались руководством Академии наук и ВСНХ. Необходимая организационная форма, обеспечившая успех научных исследований, однако, найдена была не сразу. Сначала была создана Радиевая ассоциация. По междуведомственному соглашению, утвержденному общим собранием Отделения физико-математических наук Академии наук 27 ноября 1918 г., Радиевая ассоциация имела три отделения: физическое, химическое и геолого-минералогическое. По предложению В.Г. Хлопина было разработано положение об ассоциации. Ее статус был близок к положению научно-исследовательского института; ассоциация имела научные подразделения, ученый совет, обладала соответствующими юридическими правами.

Создание Радиевой ассоциации способствовало сохранению в рамках одной организации научных сил, специализировавшихся в области исследований радиоактивности и радия. Однако очень скоро стало очевидно, что Радиевая ассоциация не в состоянии выполнить всех поставленных перед ней задач по организации исследований и поискам месторождений радиоактивных руд.

Вновь остро встал вопрос об организации научного центра. В ВСНХ и Академии наук пришли к выводу, что таким центром должен быть институт в системе Академии наук, поскольку большинство специалистов работали в академических организациях (Протокол заседания Технического совета ..., 1919).

В апреле 1921 г. при Академии наук была организована специальная лаборатория для разрешения всех научно-технических вопросов извлечения радиоактивных элементов и сопутствующих им редких металлов из отечественного сырья. В январе 1922 г. по решению Отделения физико-математических наук был учрежден Государственный радиевый

институт¹. Три отделения института — химическое, минералогически-геохимическое и физическое — соответствовали трем вошедшим в институт независимым учреждениям: Радиевой лаборатории Академии наук (ранее ответственной за организацию Радиевого завода Академии наук) и радиевым отделам КЕПС и Рентгенологического и радиологического института. Директором Радиевого института и заведующим минералогически-геохимическим отделением был утвержден академик В.И. Вернадский, помощником директора и заведующим химическим отделением — В.Г. Хлопин, ученым секретарем и заведующим физическим отделением — Л.В. Мысовский².

В первые годы существования Радиевого института его тематика была подчинена интересам создаваемой радиевой промышленности. К этому времени поиски путей извлечения радия из остатков ферганской руды, проводимые под руководством В.Г. Хлопина, увенчались успехом. По разработанной им методике отделения радия от бария "на холоду" путем дробного осаждения соляной кислотой удалось получить первые пробы радия.

Организация Радиевого института как единого центра всех исследований в области радия и радиоактивности, координирующего также производство и распределение радия, оказалась возможной в то тяжелое время благодаря совместным усилиям Академии наук и ВСНХ, усилиям ученых — В.И. Вернадского, В.Г. Хлопина, Л.С. Коловрат-Червинского, Л.Н. Богоявленского, а также руководителя химического отдела ВСНХ Л.Я. Карпова.

Энергичные меры, предпринятые ВСНХ, в частности Л.Я. Карповым, ускорили переход в производстве радия от опытной установки к организации специального завода. Существенная помощь была оказана им и в проведении основных законодательных мероприятий, обеспечивших развитие производства радия и радиоактивных препаратов в нашей стране. Особенно важное значение имело постановление Совета Труда и Оборонь от 1 марта 1923 г. о признании радия государственным валютным фондом и передачи запасов руды и радия в ВСНХ с возложением общего научного руководства добычей и учетом радия, а равно и его хранения на Государственный радиевый институт при Академии наук (Постановление СТО, 1923). Именно с организацией Радиевого института, как докладывал Наркомпросу В.Г. Хлопин в конце первого года работы нового института, появились "... все условия для широкого и успешного развития научно-исследовательской работы в области радиоактивности, еще так недавно нам совершенно недоступной, и Советская власть не может не гордиться, что на ее долю выпало приобщить русскую науку к этой столь обещающей отрасли знания ..." (Организация науки. ..., 1968, с. 173).

¹ Из протокола заседания Отделения физико-математических наук Академии наук 25 января 1922 г. (Организация науки ..., 1968, с. 171).

² В физическом отделе Радиевого института начинали свою деятельность физики С.Н. Вернов, М.Г. Мещеряков, И.И. Гуревич, В.П. Желепов, В.И. Рукавишников, Г.Н. Флеров, а с 1939 по 1941 г. работали в качестве консультантов И.В. Курчаев, А.И. Алиханов и А.И. Лейпунский.

С еще большей остротой встала проблема разведки месторождений радиоактивных руд для обеспечения новых научных исследований. Однако в ответ на запрос Бюро общих вопросов Главного управления горной промышленности от 13 июля 1922 г. Геолком сообщил только самые ориентировочные сведения о возможных общих условиях нахождения радиоактивных соединений в природных условиях (Отчет Геолкома за 1922 г., 1926).

Некомпетентность Геологического комитета объяснялась тем, что открытия месторождений радиоактивных минералов и руд к началу 20-х годов нашего века совершались все еще случайно, так как не была изучена геохимия радиоактивных элементов, являвшаяся, по выражению В.И. Вернадского (1911), труднейшей и самой запутанной в минералогии. Специальные методы разведки еще не были разработаны, а традиционные геологические методы оказались мало пригодными для разведки радиоактивных руд. Для выявления даже небольших скоплений минералов с повышенным содержанием радиоактивных элементов из-за их повсеместной распространенности требовался почти сплошной отбор образцов пород. Ничтожно малые абсолютные количества радиоактивных элементов в породах (даже в богатых рудах не превышающие 10^{-7} г/г) могли быть обнаружены в этих образцах только в результате достаточно длительных и сложных химических анализов в лабораторных условиях. Было ясно, что для разведки радиоактивных руд на огромной территории нашей страны необходимо, во-первых, найти какой-то совершенно новый подход к поискам месторождений без отбора образцов. Во-вторых, разработать новые методы ускоренного определения содержания радиоактивных элементов в многочисленных геологических коллекциях и образцах. Этим занялись прежде всего химики. Одним из первых был Л.Н. Богоявленский.

Исследования геохимии радиоактивных элементов проводились в Радиовом институте под руководством В.И. Вернадского. Было подробно изучено месторождение Тюя-Муюн, а затем и ряд других рудопроявлений (А.Е. Ферсман, В.Г. Хлопин, Д.И. Щербаков, К.А. Ненадкевич, П.А. Волков, И.Д. Курбатов, Г.В. Горшков и др.). На Тюя-Муюне было впервые поставлено серьезное научное изучение "загадочного рудного процесса" образования радиоактивных месторождений (Александров, 1926).

Институтом проводились в конце 20-х — начале 30-х годов исследования гелиеносности отдельных районов (А.И. Лукашук, 1928 г.; В.Г. Хлопин, 1931 г.; П.И. Толмачев, 1932, 1933 гг.; А.А. Черепенников, 1933 г.). Была составлена сводка о распространенности гелия в недрах Земли и сделаны обобщения о "гелиевом дыхании" нашей планеты (Герлинг, 1935). К этому же времени относятся работы по изучению геохимии радиоактивных элементов, начатые геологами Л.В. Комлевым, А.П. Герасимовым, С.П. Соловьевым, Н.М. Прокопенко. Исследования радиоактивности нефтяных пластовых вод дали основание определить широкую распространенность радиеносных вод и сделать вывод о новой форме существования радия и урана на Земле (В.И. Вернадский, В.Г. Хлопин, Л.В. Комлев, Б.А. Никитин, В.И. Баранов, Е.С. Щепотьева, М.С. Меркулова, А.Г. Самарцева и др.).

Одним из важных практических приложений развития учения о радиоактивности в тот период было создавшееся в Радиевом институте направление по определению абсолютного возраста горных пород и минералов, а также изучение теплового режима Земли и связанных с этим процессов (В.Г. Хлопин, И.Е. Старик, В.В. Чердынцев, Л.В. Комлев, Н.М. Прокопенко).

В институте в 20-х годах проводились также теоретические и экспериментальные исследования в области химии и физики ядерных процессов. Было изучено расщепление ядер под действием нейтронов, составлена систематика ядер, открыты новые ядерные превращения под действием космических лучей (Л.В. Мысовский, И.В. Курчатов, Н.И. Добротин, И.И. Гуревич, В.В. Чердынцев).

Благодаря сочетанию экспериментальных и теоретических направлений в институте был накоплен опыт проведения тонких экспериментов и созданы благоприятные условия для понимания и совместного решения физических и геологических задач в области радиоактивности. Поэтому именно в Радиевом институте был создан и в 1937 г. опробован первый ядерно-физический метод изучения геологического разреза нефтяных месторождений, первый метод будущей науки — ядерной геофизики.

ЗАРОЖДЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Впервые в Советском Союзе в 1920 г. на Алтае была измерена радиоактивность природных вод без отбора проб. Эти измерения, названные "радиометрической съемкой", привлекли внимание физиков и геологов и послужили основанием для разработки новых методов разведки полезных ископаемых.

Измерения провел инженер-химик Л.Н. Богоявленский. Он был знающим специалистом, имел достаточно большой опыт в области исследований радиоактивности и твердо верил в неограниченные возможности измерения радиоактивных излучений для понимания природных процессов. Проработав долгое время на французском радиевом заводе по изготовлению светящихся составов постоянного действия и вернувшись на родину, Л.Н. Богоявленский уже в 1918 г. стал инициатором организации производства советского радия. На территории будущего Радиевого завода в Березняках он начал проводить первые опыты по извлечению радия из остатков ферганской руды.

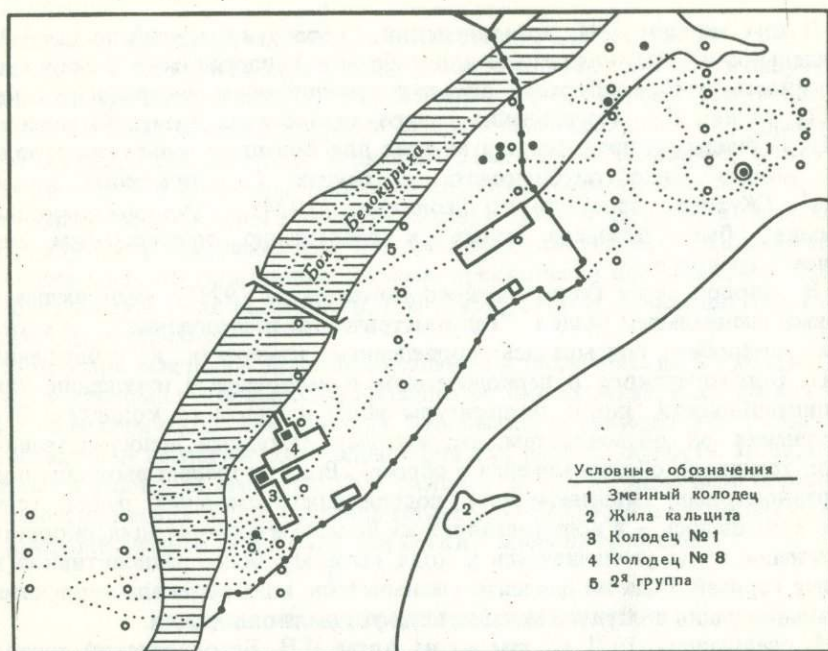
В начале 1920 г. он оказался на Алтае, в Белокурихе. В районе Белокурихинских горячих радиоактивных источников лечили раненых красноармейцев, прибывающих с фронтов гражданской войны. Целебной воды не хватало. Л.Н. Богоявленский согласился провести исследования с целью выявления новых источников. Изготовив простейший электроскоп, он измерил радиоактивность воздуха непосредственно у выходов воды и в нескольких местах на территории курорта; повышенные значения нанес на план местности и по этим точкам пытался определить "систему сбросов и трещин", из которых могла бы вытекать радиоактивная вода. Пробуренные по его указанию скважины подтвердили его прогноз. Отчет о проведенных исследованиях он направил в Геологический комитет.

В том же году Л.Н. Богоявленский, "хорошо известный по научной деятельности", был приглашен для работы в Геологический комитет на должность химика-лаборанта во вновь организуемую минералогическую лабораторию. Его исследования радиоактивности на Алтае, по мнению А.П. Герасимова, представляли интерес для большого круга геологов, и их решено было опубликовать в трудах Геологического комитета (Журнал присутствия Геолкома, 1924). "Радиометрическая съемка" была признана новым и совершенно оригинальным методом в геологии.

В годовой отчет Геологического комитета за 1921 г. был включен новый специальный раздел "Радиометрические исследования", в котором подробно описывались проведенные измерения и наблюдения Л.Н. Богоявленского о периодическом пульсирующем изменении как радиоактивности, так и температуры воды в одном из колодцев. Эти изменения он объяснял тем, что колодец находился непосредственно "над трещиной, образовавшейся в сбросе". Вода из трещин вытекала под неравномерным давлением газа, содержавшего эманацию радия: если оно повышалось — в воде растворялось больше эманации радия, скорость истечения воды увеличивалась и вода вытекала более радиоактивной и более горячей. Если же давление уменьшалось, вода вытекала медленнее, эманации радия поступало меньше, вода успевала охладиться.

В следующем, 1921 г., там же на Алтае Л.Н. Богоявленский провел измерения радиоактивности почвенного воздуха в 47 точках. Эти измерения уже можно было назвать первыми опытами радиометрической съемки, проведенной в Советском Союзе. Практическая цель работ не изменилась — это по-прежнему были поиски новых радиоактивных источников для курорта. Помимо практических задач Л.Н. Богоявленский имел в виду провести отработку основных принципов радиоактивной разведки. Он несколько усовершенствовал обработку полученных данных. Измеренные величины радиоактивности почвенного воздуха были нанесены им на план, в нескольких точках дополнительно проставлены значения, полученные путем интерполяции, и затем все точки с одинаковым значением радиоактивности соединялись линиями — изорадами (рис. 1). Поскольку почва над местами выхода газов была более радиоактивна, то по линиям повышенной радиоактивности оказалось возможным нанести на план недоступные прямому наблюдению трещины и наметить выходы теплой радиоактивной воды и газа (Отчет Геологического комитета, 1924).

Геологический комитет на заседании 22 марта 1922 г. заслушал доклад Л.Н. Богоявленского "О принципах радиометрической съемки". На членов Геологического комитета произвели сильнейшее впечатление и доклад, и особенно прибор, которым Л.Н. Богоявленский производил измерения в Белокурихе. Высказали свое положительное мнение по существу доклада В.И. Вернадский, В.И. Бауман, В.В. Никитин, В.Н. Вебер, Д.И. Мушкетов, А.В. Фаас, А.Н. Чураков, В.Н. Лодочников (Журнал присутствия Геолкома, 1926). Ученые считали, что с помощью приборов и метода Богоявленского наконец-то появилась возможность начать систематические исследования радиоактивности территории нашей страны.



Р и с. 1. Первая карта радиометрической съемки, составленная Л.Н. Богоявленским для курорта Белокуриха

После заключительной речи вице-директора В.К. Котульского по предложению В.И. Вернадского Геологический комитет постановил: "... предложить хозяйственному комитету изыскать средства для изготовления трех приборов" для радиометрической съемки (Журнал присутствия Геологического комитета, 1926, с. 65).

На том же заседании В.И. Вернадский предложил начать радиометрическую съемку Тюя-Муюнского месторождения ванадиево-радиевых руд в Фергане. Осенью 1922 г. при Академии наук была создана Комиссия по организации геофизических работ и метеослужбы РСФСР (Журнал присутствия Геологического комитета, 1926). Предполагалось, что комиссия в числе других геофизических работ будет проводить радиометрическую съемку и полевые радиометрические исследования месторождений полезных ископаемых.

В 1923 г. Л.Н. Богоявленский провел радиометрическую съемку в Пятигорске, на Теплосерной улице, с помощью своего значительно улучшенного прибора, который представлял собой специальный электроскоп с тончайшими металлическими лепестками. Он устанавливался на треножнике, что позволяло легко перемещать его. Кавказское отделение Геологического комитета проявило большую заинтересованность в результатах съемки и выделило специальную бригаду для бурения скважин на лечебную радиоактивную воду по указаниям Л.Н. Богоявленского. И эти опыты увенчались успехом. Определив радиоактивность в более чем 150 пунктах, он

обнаружил неизвестный ранее пласт радиоактивной воды, и бурение шести скважин вполне оправдало себя.

Л.Н. Богоявленский попытался вывести зависимости распределения радиоактивности на земной поверхности от глубинного строения. Для этого в процессе бурения из скважин извлекались образцы пород, которые тщательно исследовались на радиоактивность. Вначале казалось, что распределение точек повышенной радиоактивности совпадало с радиоактивным водоносным пластом. Но по мере обработки новых данных положение стало запутываться — повышенная активность не зависела непосредственно ни от радиоактивности горных пород, ни от положения водоносного пласта, который четко прослеживался. По мнению Л.Н. Богоявленского, они отражали влияние какого-то мощного источника излучений.

Стремясь найти объяснение замеченных им аномалий радиоактивности, Л.Н. Богоявленский провёл расчеты с привлечением известных ему физических теорий. Он был уверен, что обнаружил новое, совершенно не исследованное явление — гамма-излучение "огромной проникающей способности", несомненно, сопровождающее излучение эманации радия глубокой воды (Богоявленский, 1925а).

В качестве доказательства возможности открытия столь необычного излучения он провел предсказания известного французского физика Ж. Перрена о существовании лучей с большой проникающей способностью, исходящих от планет и от Солнца и из недр Земли, которые человек еще не был в состоянии обнаружить (Perrin, 1919). Ж. Перрен считал, что всякая химическая реакция может быть вызвана лучистой энергией и что радиоактивное излучение должно обладать настолько большой проникающей способностью, что может проходить через слои любого вещества и любой толщины.

Л.Н. Богоявленский был уверен в том, что ему удалось зафиксировать именно такие перреновские лучи, и он назвал обнаруженную им в Пятигорске повышенную радиоактивность, не связанную с водоносными пластами, "проникающей радиацией земли" (Богоявленский, 1925а).

Подводя некоторые итоги практической и теоретической сторон работ Л.Н. Богоявленского по радиометрической съемке, можно сказать, что успехи в бурении скважин, давших новые источники радиоактивной воды, показали целесообразность применения новых методов поисков и разведки, основанных на регистрации радиоактивного излучения специальными приборами. Стали разрабатываться первые методы радиометрической съемки.

Л.Н. Богоявленский не только доказал возможность измерений ионизации почвенного воздуха для поисков выходов радиоактивной минеральной воды, но и возможность использования гамма-электроскопов для поисков других природных объектов.

Независимо от работ Л.Н. Богоявленского одним из первых провел радиометрическую съемку при поисках радиоактивных руд профессор Г.О. Ерчиковский. Он много времени потратил на разработку и изготовление специального электроскопа, который был на уровне техники того времени и поэтому мало отличался от прибора Л.Н. Богоявленского. Полевым гамма-спектрометром собственной конструкции он в 1923—1927 гг.

тщательно промерил активность воздуха над отвалами радиоактивной руды, а затем провел радиометрическую съемку коренного залегания руд на территории рудника и позднее во всем районе Тюя-Муюна (Ерчиковский, 1928).

Г.О. Ерчиковский старался определить степень точности и стабильность своих измерений. Он заметил, что на время разрядки электроскопа, по которому он вычислял радиоактивность в каждой точке, оказывают влияние самые различные причины, в частности метеорологические условия. Влажность воздуха, дождь, солнце, ветер или отсутствие ветра могли существенно изменить время разрядки, и поэтому он предлагал обязательно их учитывать при измерениях.

Научные интересы Г.О. Ерчиковского были связаны с несколькими, чем у Л.Н. Богоявленского, областями исследований радиоактивности, и поэтому он мало уделял внимания отработке и внедрению методов радиометрической съемки. К тому же Г.О. Ерчиковский не торопился с выводами до полного выяснения физической сущности замеченных им явлений. Поэтому его исследования проводились гораздо медленнее и рекомендации о возможности применения радиометрической съемки были весьма осторожными. Они сводились к тому, что полевые измерения радиоактивности гамма-электроскопом можно успешно проводить только для обнаружения радиоактивных руд, да и то при условии содержания в них достаточного количества радиоактивных элементов.

Работы первых исследователей радиоактивности земной поверхности привлекали внимание ученых и широко обсуждались. По оценке геолога Д.И. Щербакова¹, их приборы мало отличались друг от друга, были основаны на одном принципе, улавливали только гамма-излучение радиоэлементов горных пород (Щербаков, 1926).

Радиометрический метод должен "...иметь большое практическое значение, — заявил президент Главной палаты мер и весов академик Д.П. Коновалов, — так как дает возможность обнаружить местонахождение всех веществ, влияющих на радиацию земли, подземных ключей, нефтяных месторождений и даже, может быть, рудных залежей" (Деятельность..., 1924, с. 10).

Через два года после признания метода радиометрической съемки Геологическим комитетом он был рекомендован для широкого внедрения Главной палатой мер и весов, в которой Л.Н. Богоявленский после возвращения с Алтая в 1921 г. и до конца своей жизни работал в должности заведующего радиологической лабораторией.

В последующие годы продолжались исследования сильного радиоактивного излучения или, как назвал его Л.Н. Богоявленский, "проникающей радиации Земли".

В 1924 г. Л.Н. Богоявленский исследовал пробы грунта в зоне высокой радиоактивности в Пятигорске. Оказалось, что заполнявшие трещины вещество обладало высокой активностью и вполне могло являться причиной как высоких аномальных значений радиоактивности на поверхности,

¹ Дмитрий Иванович Щербаков (1893–1966 гг.) был избран действительным членом Академии наук СССР в 1953 г.

так и повышенной радиоактивности воды. Химические анализы подтвердили настолько высокое содержание в нем радиоактивных элементов (тория и радия), что его можно было признать промышленным материалом для извлечения радия (Богоявленский, 1925а). Для выяснения вопроса, каким путем и откуда мог попасть туда радий, была исследована вода, в которой была обнаружена только эманация радия и ничто не указывало на присутствие тория. Л.Н. Богоявленский предполагал, что повышенная радиоактивность воды могла быть результатом присутствия в ней урана, вынесенного в виде коллоида из глубин восходящими потоками.

Загадка повышенной радиоактивности, наблюдаемой на земной поверхности, продолжала оставаться неразрешенной. Учитывая большой интерес к изучению природы проникающего излучения, физический отдел Радиевого института организовал в 1923–1925 гг. на опытном участке специальные систематические наблюдения за радиоактивностью не только поверхности Земли, но и почвы на разных глубинах, а также воздуха на разных высотах от Земли (Мысовский, 1925).

В 1927 г. Л.Н. Богоявленский и А.А. Ломакин провели радиометрическую съемку на Ухте на площади около 40 га по профилям через каждые 100–150 м. Построенные изорады оказались замкнутыми и как бы отражали контур погребенного активного тела. Однако ими было отмечено и изменение в весьма широких пределах "проникающей радиации земли". Причиной подобных изменений могли быть или излучения рассеянных радиоактивных элементов в почве, или излучения неизвестных радиоактивных глубинных слоев. Поскольку радиоактивность отобранных образцов почвы была примерно везде одинаковой, то был сделан вывод, что они открыли "действие значительных масс радиоактивных веществ с более жестким излучением, чем радий" (Богоявленский, Ломакин, 1927). Это как бы подтвердило первое предположение Л.Н. Богоявленского о существовании особой проникающей земной радиации, высказанное им еще в 1920–1922 гг.

В начале 30-х годов Г.О. Ерчиковский обратил внимание на непонятное сильное гамма-излучение, проявлявшееся в некоторых местах во время измерений радиоактивности в Тюя-Мукуне. Решив, что излучение идет от сильно радиоактивных руд, выходящих на поверхность, он измерил радиоактивность в специально сделанных шурфах, но никаких признаков более радиоактивной руды или минералов не обнаружил ни на поверхности, ни в прилегающей зоне.

Таким образом, было отмечено неизвестное сильное радиоактивное излучение в местах, где не было оснований предполагать залежи радиоактивных руд или скопления радиоактивных элементов, растворенных в глубинных водах. Однако у ряда ученых существование проникающей радиации Земли продолжало вызывать сомнение, поскольку "наличие лучей подобной жесткости ни для одного из всех известных радиоактивных веществ не было обнаружено" (Кириков, Тверской, Граммаков, 1932). Выяснение природы этих излучений было поручено Радиевому институту, организовавшему специальные наблюдения на опытном участке за радиоактивностью воздуха, поверхностных и погребенных слоев почвы.

ПЕРВАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В начале 20-х годов одной из самых острых проблем разрушенного народного хозяйства нашей страны была проблема добычи топлива. Успешные результаты бурения скважин на радиоактивную воду по данным первой радиометрической съемки, а также уверенность в неисчерпаемых возможностях метода исследования радиоактивности побудили Л.Н. Богоявленского попытаться начать поиски нефтяных месторождений этим новым методом. Кроме того, Л.Н. Богоявленский предполагал, что нефть, как правило, радиоактивна и это должно обязательно проявиться на земной поверхности.

Изучение радиоактивности нефти стало проводиться в первые же годы после открытия явления радиоактивности, но, несмотря на это, информация оказалась весьма скудной. Присутствие эманации радия в нефти было впервые обнаружено в 1904 г. в США Е. Бартоном (Barton, 1904). Затем было установлено полное соответствие растворимости эманации радия в нефти законам растворимости других газов в жидкостях (Химстедт, 1904 г.; Траубенберг, 1904 г.; Махе, 1904 г.; Коффлер, 1908 г. и др.). Была известна достаточно высокая абсорбционная способность нефти к эманации радия — коэффициент абсорбции нефти в десятки раз больше, чем у воды, и отмечено его некоторое повышение с понижением температуры. Л.Н. Богоявленский считал, что эманация радия, аккумулируясь сначала в нефтяной залежи, со временем постепенно поступает на поверхность и создает повышение концентрации над залежью. Измеряя радиоактивность почвенного воздуха, можно по аномалийным значениям его радиоактивности определить контур нефтяной залежи. Кроме того, эманация радия может создавать повышенную концентрацию в местах естественных выходов природного горючего газа, связанного с нефтяным месторождением. Следовательно, по аналогии с проведенными измерениями и определениям выходов радиоактивной воды на Алтае и в Пятигорске Л.Н. Богоявленский считал возможным определять выходы природного горючего газа, если они содержали эманации радия.

Л.Н. Богоявленский (1923, 1924) предложил для проверки нового поискового метода провести исследования на радиоактивность нефти, газа и сопровождающих их образований в широком масштабе на всех месторождениях Советского Союза. После таких предварительных исследований он считал возможным начать проведение радиометрической съемки или радиометрической разведки на нефть. Полученные данные, по его мнению, должны быть вполне достаточными для закладки буровых скважин на вновь открытых таким методом нефтяных и газовых месторождениях.

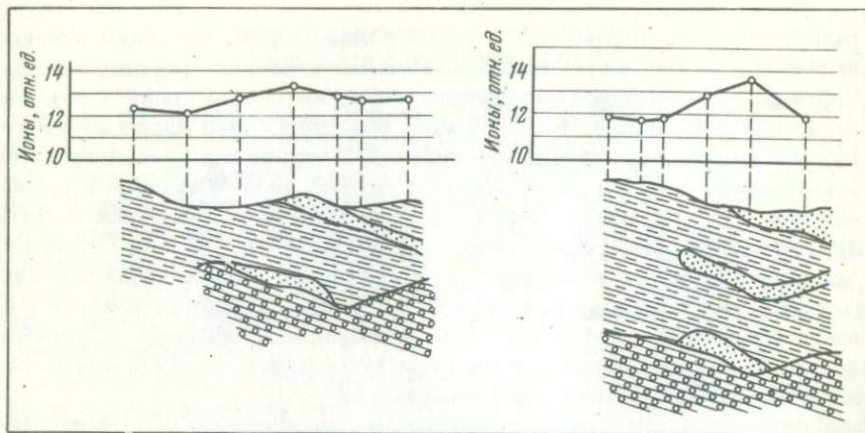
Постановка исследований такого масштаба на радиоактивность нефти, газа и вмещающих пород в природных условиях была новой. Статья Л.Н. Богоявленского "О применении радиометрической съемки к разведке нефтяных месторождений" была помещена в журнале "Нефтяное и сланцевое хозяйство" с комментариями известного геолога-нефтяника К.П. Калицкого (1923). Поддержав предложение об исследованиях на

радиоактивность нефти, газа и горных пород, К.П. Калицкий, однако, высказал сомнение в принципиальной возможности разведки погребенных нефтяных месторождений по данным измерений радиоактивности воздуха на земной поверхности. Нефтяные месторождения, как правило, являются хорошо закрытыми ловушками и поэтому в течение длительного времени сохраняют газовый состав и высокое давление. Если даже нефть и радиоактивна, то эта радиоактивность должна всецело поглощаться толщей вышележащих пород. Кроме того, наклон нефтяных пластов, обычный для большинства месторождений, еще больше может увеличивать толщу горных пород в сторону падения пластов. Следовательно, если на поверхности измеряются излучения, действительно исходящие из нефтяного пласта, то по результатам радиометрической съемки все равно невозможно точно определить контур нефтяной залежи.

Летом 1924 г. на одном из нефтепромыслов Майкопа Л.Н. Богоявленский провел первую в СССР радиометрическую съемку с целью определения возможности использования метода для разведки на нефть. Понимая принципиальное различие поисков нефтяных и рудных месторождений, в том числе радиоактивных, и не располагая достаточными сведениями об условиях залегания нефти и происходящих в залежах физико-химических процессах, он выбрал для проведения первого опыта хорошо изученный район. Здесь работал еще в 1910–1911 гг. И.М. Губкин. Был выбран давно выработанный участок, на котором нефтяные пласты в виде отдельных линз в однородных породах располагались на двух основных горизонтах.

Измерения радиоактивности почвенного воздуха в заранее намеченных точках профилей были проведены с особой тщательностью (Богоявленский, 1927). Для учета направления, по которому поступает наибольшее излучение, у стенок ионизационной камеры были установлены дополнительные свинцовые фильтры толщиной в 1 см, а при измерениях поочередно открывалась то одна, то другая сторона. Полученные данные были нанесены на геологический разрез по профилям (рис. 2). На приведенном рисунке практически невозможно рассмотреть какие-либо закономерности в распределении значений радиоактивности. Понимая недостаточную обоснованность своих утверждений, Л.Н. Богоявленский стал искать источник несколько повышенных значений радиоактивности.

Попутно Л.Н. Богоявленский проводил отбор образцов горных пород и почв на земной поверхности — их радиоактивность оказалась ничтожно малой. Отсюда следовало, что источником повышенного радиоактивного излучения, якобы замеченного им над нефтяным месторождением, могли быть огромные массы погребенного вещества нефтеносных песков. Такое утверждение вполне могло соответствовать существовавшим в то время представлениям об огромной абсорбирующей способности нефти к радиоактивным газам из подстилающих нефтяную залежь пород. Эти органические породы должны были бы быть более богатыми радием, чем окружающие горные породы благодаря большей абсорбционной способности к радио входящих в их состав коллоидов.



Р и с. 2. Разрезы двух профилей Майкопского нефтяного промысла по данным радиометрической съемки, проведенной Л.Н. Богоявленским, 1924 г.

Точками показаны нефтеносные пески

После измерений радиоактивности на нефтяном месторождении Майкопа Л.Н. Богоявленский окончательно сформулировал принцип радиометрической разведки. При этом он учитывал и высказанные в начале 20-х годов весьма гипотетические взгляды французского физика Ж. Перрена о существовании особой планетной радиации Земли. По Л.Н. Богоявленскому, всякое тело, физические свойства которого отличаются от физических свойств вмещающей породы, может при некоторых условиях изменять интенсивность и характер "очень проникающей радиации" Земли. Измеряя эту радиацию и оценивая характер аномалий, можно приблизительно определить глубину залегания активного тела (Богоявленский, 1925а), а также его природу. Этот принцип мог, по его мнению, успешно применяться при поисках не только нефти, но и многих других полезных ископаемых, особенно радиоактивных водных источников, радиоактивных (урановых и ториевых) руд, природных газов.

ПОПЫТКИ СОЗДАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В начале 20-х годов стало особенно заметно отставание разведочных работ в нефтяной промышленности. Неглубокие месторождения были частично выработаны или уже находились в стадии эксплуатации. Выявление же глубоких продуктивных горизонтов требовало проведения дорогостоящего бурения разведочных скважин с отбором керна.

Первый Всесоюзный съезд нефтеработников, созванный Горным отделом ВСНХ в декабре 1925 г., отметил, что разведанных запасов может хватить только на несколько лет, а обширность районов, имеющих признаки нефти, и сравнительная медлительность геологических и разведочных работ вынуждают искать иные более скорые методы исследования

(Резолюция..., 1925). Поэтому с особым вниманием на съезде были заслушаны и обсуждены доклады П.М. Никифорова, С.И. Миронова, Б.К. Нумерова о первых опытах применения физических или вернее геофизических методов к разведке нефтяных месторождений. Результаты исследований, как показали докладчики, могли быть легко переложимы на "геологический" язык. Съезд признал необходимым всемерно развивать геофизические методы разведки как единственно возможные для выявления ранее недоступных глубоких продуктивных горизонтов. Возможности геофизических методов разведки нефтяных месторождений стали широко обсуждаться. Я.В. Гаврилов (1926) писал, что геофизические методы как в теории, так и на практике, в особенности в применении к разведке на нефть, обещают большее применение в будущем. Они должны дополнять общие геологические исследования в "случаях, когда поверхностные покровы земной коры скрывают от глаз наблюдателя структуру ее". Геофизические наблюдения, подчеркивалось в статье, производятся на поверхности земли посредством "чисто научных инструментов и не зависят от личных качеств наблюдателя".

Много надежд возлагалось и на радиометрический метод разведки. (Радиометрический метод разведки нефтяных месторождений, как термин и название одной из разновидностей геофизической разведки, был сразу же принят в научной и технической литературе.) Он представлялся не косвенным, а прямым дистанционным методом разведки на нефть, поскольку, как тогда считалось, был основан "на свойстве нефти растворять радиоактивные элементы".

Идеи Л.Н. Богоявленского о создании радиометрического метода разведки нефтяных месторождений нашли достаточное признание иностранных, в частности немецких, геофизиков. Его статьи были переведены и без промедления опубликованы в немецких журналах¹. В 1926 г. стало известно о проведении подобных работ в Германии и Англии. Публикации того времени выявили два взгляда на перспективу применения радиоактивной съемки. Одни авторы приводили результаты своих исследований и весьма осторожно высказывались о перспективах применения метода для разведочных целей (Р. Амбронн в Германии и М. Мюльберг в Англии), другие же без достаточных для этого оснований были настроены весьма оптимистично (Р. Маурер).

Р. Амбронн (Ambronn, 1926), опубликовавший одно из первых специальных пособий по геофизическим методам разведки, рассматривал наравне с другими и "радиологический метод", который он связывал с измерением физических характеристик геологических объектов. Много внимания Р. Амбронн уделил советским исследованиям: он подробно разобрал основные положения, высказанные Л.Н. Богоявленским, и привел данные А.А. Черепеникова (1927) о радиоактивности нефти. Р. Амбронн привел некоторые чисто справочные данные о свойствах радиоактивных веществ, способах измерений радиоактивности горных пород, почв, воздуха и попытался оценить получаемые при измерениях

¹ Например, статья "The Petroleum and Oil shall industry" была опубликована в немецком журнале "Russland" (1923, № 2, с. 239).

радиоактивности данные. Он считал недостаточно убедительным понятие "ультражесткого излучения" или "земной радиации", введенное Л.Н. Богоявленским для объяснения причин радиоактивных аномалий вблизи нефтяного месторождения. Он не связывал первоисточник этих аномалий с нефтяной залежью. Несмотря на это, он рекомендовал проведение радиометрической съемки, так как результаты съемки могли, по его мнению, оказаться полезными при решении общих геологических задач, особенно при изучении тектонических нарушений.

Р. Амбронн измерил радиоактивность воздуха вблизи образцов некоторых горных пород, характерных для нефтяных скважин. Затем построил колонку условного разреза скважины с соответствующими величинами радиоактивности каждой породы. Это была первая, как мы теперь называем, диаграмма радиоактивного каротажа (РК). При этом Р. Амбронн совершенно правильно определил, что наибольшей радиоактивностью обладают глины, а не нефтеносные пески, как предполагал Л.Н. Богоявленский. Из этого следовало, что прямой связи между радиоактивностью на земной поверхности и нефтеносных пластов не могло быть, но такой вывод в то время еще не был сделан.

Радиометрическую разведку на нефть, по Р. Амбронну, следовало вести в соответствии с иными, чем у Л.Н. Богоявленского, принципами. Необходимо было измерять радиоактивность не на поверхности, а по пробам воздуха, взятым в скважине вблизи каждой породы, и затем по различию в их величинах определять тип породы. Он разработал специальную систему труб и воздухопроводов для отбора и транспортировки проб с различных глубин скважин на поверхность. По величине радиоактивности проб Р. Амбронн считал возможным выявлять глинистые покровы, песчаные нефтеносные и другие характерные горизонты. Но опытная установка оказалась слишком громоздкой, пробы воздуха сохранялись только при перекачке с небольших глубин порядка десятков и двух-четырех сотен метров и поэтому почти никакого практического значения не имела.

Очень интересны результаты работы М. Мюльберга, опубликованные им в приложении к популярной книге известного геолога Я. Стиганда "Очерки природного проявления и геологии нефти", предназначенной для общего ознакомления с геологией нефти (Stigand, 1925). М. Мюльберг пришел к выводу, что исследование радиоактивности поможет получить дополнительные данные для определения границ пород, сбросов, наличия нефтяных пластов. Если измерения производились на расстоянии от породы, не превышающем двух футов, можно, по его мнению, заметить разницу в величине радиоактивности каждой горной породы. Повышенная радиоактивность свойственна также сбросам и зонам выветривания. Он не отвергал возможности в будущем выявления и использования факта способности нефти поглощать радиоактивные эманации. М. Мюльберг, как и Р. Амбронн, пришел к выводу, что при исследовании нефтяных месторождений следует отбирать образцы воздуха в буровых некрепленных стальными трубами скважинах вблизи каждого пласта. Вместо сложной системы трубопроводов для перекачки пробы воздуха он предложил использовать газовые пробоотборники. Измерение

относительной радиоактивности этих проб, утверждал М. Мюльберг, поможет выявить сбросы или нефтяные пласты, не замеченные при бурении.

Статья "Радиоактивные измерения как способ определения нефтяных месторождений" другого немецкого ученого Р. Маурера (1926) носила чисто рекламный характер¹. Она была написана, по признанию автора, с целью привлечения внимания к новому методу, якобы блестяще оправдавшему себя при исследовании двух месторождений. Р. Маурер измерял радиоактивность воздуха и по результатам определял контуры нефтяных месторождений. Он доказывал также, что метод измерения радиоактивности почвенного воздуха на земной поверхности над нефтяным месторождением исключает влияние присущих геологам субъективных впечатлений и поэтому должен получить дальнейшее развитие.

Появление статьи Р. Маурера показывало, насколько заманчивой была возможность по измерениям с поверхности Земли определять контур и глубину залегания нефтяного месторождения и даже, как он писал, по полученным данным сразу же намечать расположение буровых скважин.

Ясная перспективность только появившихся в то время геофизических методов разведки вызвала своего рода "геофизический бум". В Германии, например, в 20-х годах было организовано много специальных разведочных фирм. Радиометрический метод разведки на нефть был включен в комплекс исследований наравне с другими уже достаточно отработанными геофизическими методами. Международная комплексная геофизическая организация, в правление которой входили представители немецких компаний, намечала уже в 1928—1929 гг. провести в особенно широком масштабе разведку на нефть в Австралии всеми существующими, в том числе радиометрическими, методами.

Очень скоро, однако, стало ясно, что измерение радиоактивности на земной поверхности для определения погребенных нефтяных месторождений не может иметь практического значения. Гравиметрические, магнитометрические и другие геофизические методы, основанные на измерении физических свойств горных пород (удельного веса, магнитных и электрических свойств, упругости и т.п.), выясняют особенности их залегания на больших расстояниях по глубине и по горизонтали, т.е. помогают выявлять глубинное строение в районах исследований. При разведке нефтяных месторождений геофизическими методами выявляются структуры, благоприятные для скопления нефти. Что же касается обнаружения с земной поверхности в пластах самой нефти, то геофизики, по их признанию, не располагают для этого физическим методом (Заборовский, 1932). Поскольку нефтяные коллекторы хорошо обнаруживаются сейсмическими, гравиметрическими и другими нерадиоактивными методами, именно они и начали весьма бурно развиваться в СССР и других странах.

¹ Советский журнал "Нефтяное хозяйство" в том же 1926 г. опубликовал краткую аннотацию статьи Р. Маурера.

ПЕРВЫЕ УСКОРЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ РАДИОАКТИВНОСТИ МИНЕРАЛОВ И РУД

Поиски и разведка радиоактивных минералов и руд, так же как и других полезных ископаемых, проводились в первые десятилетия XX в. обычными геологическими методами. Образец предполагаемой радиоактивной породы, найденный геологом в поле, подвергался затем различным химическим анализам в лаборатории. Там же определялась и его радиоактивность. Для этого часть исследуемого минерала измельчалась и сжигалась, по величине выделившейся эманации определялось общее содержание в нем радиоактивных элементов. Районы, из которых были получены образцы с повышенной радиоактивностью, вновь особенно тщательно должны были обследоваться геологами.

Анализы на радиоактивность отнимали много времени, поэтому часто проводились выборочно.

В первые годы Советской власти в Геологическом комитете резко увеличилось число разведочных партий. Геологический материал, в том числе и образцы возможных радиоактивных минералов и руд, начал поступать в лаборатории Геолкома во все возрастающих количествах. Лаборатории не успевали проводить сложные анализы; не было квалифицированных специалистов-химиков для проведения массовых анализов.

Необходимо было найти пути ускорения лабораторных анализов горных пород на радиоактивность, иначе невозможно было вести разведку радиоактивных руд и минералов. Идею нового направления в ускорении обследования коллекций минералов на радиоактивность подсказал опыт проведения радиометрической съемки. Вскоре было предложено много способов лабораторного анализа минералов на радиоактивность. Несмотря на некоторые совершенно незначительные различия в предложениях отдельных авторов, все они по существу предлагали способ измерения радиоактивности воздуха вблизи образца. Обычно образец помещался в ионизационную камеру и измерялась степень ионизации в ней воздуха. И хотя точность измерений в большей степени зависела от искусства лаборанта, чем от конструкции того или иного прибора — камеры и электроскопа, тем не менее получалось представление об относительной степени радиоактивности образцов по отношению к эталонам.

Новые способы оказались простыми и значительно ускорили проверку больших коллекций на радиоактивность. В случаях, когда встречался минерал с повышенной активностью, можно было обследовать его еще раз старыми методами. К концу 20-х годов многочисленные новые способы обследования минералогических коллекций еще не были унифицированы, но условно их можно разделить на три группы или вида.

К первому виду, без специального названия, отнесем способы, при которых образец закладывался в специальную камеру с электроскопом из металлической проволоки, заранее заряженной до высокого потенциала. Через некоторое, довольно продолжительное время под воздей-

ствием радиоактивных излучений образца на проволоке появлялся осадок, который свидетельствовал о наличии радиоактивных элементов в минерале.

Результаты измерений радиоактивности этими способами были ненадежны, так как зависели от многочисленных непредвиденных фактов (Арцыбашев, Плешанова, 1928).

Ко второму виду отнесем все статические способы исследования радиоактивности. Так же как и в способах первого вида, образец помещался в камеру, под воздействием его излучений воздух в камере ионизировался, но величина радиоактивной эманации или только ее присутствие (или отсутствие) определялись по величине тока насыщения, возникавшего в результате ионизации воздуха в камере. Основным недостатком этих способов была нестабильность результатов определений. При повторном исследовании одного и того же образца получались большие расхождения в величине силы тока и, следовательно, в определении его радиоактивности. Причиной расхождений была неоднородность поля излучений образца по объему камеры. В зависимости от местоположения образца создавались объемы с более или менее интенсивным излучением, а иногда могло появляться разряженное или даже так называемое мертвое пространство.

Способы третьего вида — аспирационные — сохраняли принцип измерений и последовательность операций двух первых групп. Разница состояла в том, что ионизированный излучениями образца воздух из камеры продувался дальше, в коллектор, где и измерялась степень ионизации.

Почти целое десятилетие радиоактивность минералов определялась указанными выше способами. В схему лабораторной измерительной установки обязательно входили заряжаемый электроскоп и ионизационная камера. Надежность определения радиоактивных свойств минералов при этом зависела в основном от точности измерения степени ионизации воздуха в камере и установления ее количественной связи с радиоактивностью образца — источника излучений. Степень ионизации воздуха измерялась по скорости разрядки электроскопа, которая вначале определялась по времени спада листков электроскопа до определенного положения (время начала и конца спада лаборант отмечал по своим часам). Позднее в установку встраивали обычный микроскоп. С помощью микроскопа удавалось замечать совсем незначительные изменения в положении листков электроскопа, а следовательно, заметить его реакцию на присутствие даже самых незначительных излучений образца.

Ни один из указанных выше способов не обеспечивал надежной стабильности результатов измерений из-за неравномерности поля излучений образца в камере. Чтобы создать поле излучений равномерным во всем объеме камеры, образец помещали то на специальную подставку, то на металлический лист, создавали замкнутую циркуляцию воздуха встроенным вентилятором и вообще пытались применить самые разные приспособления. Однако все усовершенствования не могли оказать решающего влияния на получаемые результаты; нововведения не изменяли сущности способов, а уровень техники того времени не давал возможности получать

более точные данные. Это обстоятельство до некоторой степени способствовало появлению в печати недостаточно обоснованных утверждений рекламного характера ряда авторов о достоинствах своих приборов и "принципиальных пороках" конструкции и теории приборов конкурентов. Часто такого рода споры приносили пользу.

Так, во время дискуссии, развернувшейся на страницах журнала "Вестник Геологического комитета" по поводу нового аспирационного прибора С.А. Арцыбашева (1928), были пересмотрены работы по теории аспирационных приборов В.И. Баранова (1925) и А.П. Кирикова (1925). В результате такого обсуждения было выработано общее мнение, что принципиально невозможно использовать аспирационные приборы для точных подсчетов содержания радиоактивных элементов в геологических образцах и любые попытки подобного рода обречены на неудачу. В то же время было отмечено, что неточности метода и приборов несколько не препятствовали достижению основной цели быстрого предварительного опробования на радиоактивность громадного материала с достаточной "технической" точностью. Двухлетняя работа, например, того же аспирационного прибора привела к обнаружению нескольких десятков радиоактивных рудопроявлений, практическая ценность которых выяснялась уже при полевых работах (Баранов, Кириков, 1928).

Почти одновременно стала проявляться настоятельная необходимость в создании способов и приборов точного определения содержания ничтожных количеств радия, урана, тория и других радиоактивных элементов в слабо активных обычных горных породах. Это требовалось и геохимикам, начавшим изучение геохимии радиоактивных элементов, и физикам, занимавшимся разработкой способов определения абсолютного возраста горных пород и геологических формаций. Для указанных целей применялись те же способы измерения радиоактивности по степени ионизации воздуха вблизи образца. Следует удивляться виртуозности исследователей, добивавшихся хороших результатов.

Предельной для того времени можно считать точность установки для измерения малых количеств радия в гранитах, разработанную В.И. Барановым. Установка, основанная на принципе измерения степени ионизации воздуха вблизи образца, включала приспособления, уменьшающие искажения различного рода. В.И. Баранов принял меры к снижению влияния налета эманлирующего вещества на стенки камеры, поляризации самого микроскопа после его зарядки перед началом работы, механических колебаний прибора в процессе измерений, изменения температуры окружающей среды и т.п. (Баранов, 1928).

В.И. Баранову удалось измерить с помощью своей методики и прибора в довольно широком диапазоне содержания радия в гранитах — от $0,9 \cdot 10^{-12}$ г/г в розовом пегматите до $10,5 \cdot 10^{-12}$ г/г в гранитной породе Табошарского рудника.

Способы определения радиоактивности минералов и руд по степени ионизации воздуха альфа-излучением образцов, хотя и оказали существенную помощь геологам в ускорении процесса открытия месторождений радиоактивных руд и минералов, к началу 30-х годов почти полностью себя исчерпали.

В физических лабораториях в начале 30-х годов стали искать более простые и надежные способы регистрации радиоактивного излучения. Начали разрабатываться методы прямой регистрации бета-излучения (Е.С. Шепотьева) и гамма-излучения образцов. Преимуществом этих методов по сравнению с регистрацией альфа-излучения была возможность облучения индикатора извне. При регистрации гамма-излучения перемена положения образца не сказывалась на чувствительности измерительного прибора. Постепенно регистрация гамма-излучения для определения радиоактивности образца стала использоваться при исследованиях горных пород в разрезе нефтяных скважин. На регистрации гамма-излучения были основаны первые методы ядерной геофизики, развитие которых будет подробно освещено в следующих главах.

СТАНОВЛЕНИЕ НОВОГО – РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО – НАПРАВЛЕНИЯ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ МИНЕРАЛОВ И РУД

Использование радиоактивных излучений как поисковых критериев для практических целей разведки полезных ископаемых в начале 20-х годов находилось еще в стадии изучения. Кроме некоторых положительных результатов по выявлению новых радиоактивных минеральных источников на Алтае и в Пятигорске, или, вернее, кроме первых опытов радиометрической съемки Л.Н. Богоявленского, не были известны никакие другие примеры, когда эти методы принесли какую-либо практическую пользу.

Лабораторные анализы, основанные на измерении степени ионизации воздуха под влиянием излучений образцов, хотя и оказали существенную помощь геологам в ускорении процесса открытия месторождений радиоактивных руд на территории Советского Союза, все же не изменили основ и порядка существовавшей тогда традиционной геологической разведки. В литературе того времени существовали лишь общие указания о возможности использования радиометрических измерений для разведочных целей.

Геологический комитет, подводя итоги в области геофизики за 1924 г., подчеркнул в своем решении необходимость проведения специальных полевых радиометрических исследований. По мнению известного ученого и практика А.К. Гедовиуса (1927), поиски месторождений радиоактивных руд следовало проводить прежде всего методами и приборами, чувствительными к радиоактивным излучениям.

Радиевый институт помимо общего научного руководства добычей, учетом и хранением радия, осуществлявшегося в соответствии с постановлением Совета Труда и Оборона от 1 января 1923 г., начал разработку новых методов поисков месторождений радиоактивных минералов и руд.

Параллельно разработка методов и разведочные работы начались в Институте прикладной геофизики, Геологоразведочном институте и других научно-исследовательских и геологических организациях. Активную помощь в изыскании новых источников радиоактивного сырья начали

оказывать советские государственные учреждения, в первую очередь Главное управление горной промышленности и Управление химической промышленности ВСНХ.

В декабре 1923 г. Радиевый институт созвал в Ленинграде техническое совещание всех заинтересованных организаций для обсуждения вопроса об исследованиях радиоактивных минералов руд (Курбатов, Бруновский, 1925).

Доклады и сообщения касались широкого круга вопросов: от морфологии и геохимии района радиоактивного рудника Тюя-Муюн, разведки, добычи и обогащения урано-ванадиевых руд до химической переработки тюя-муюнской руды. Обсуждались также первые результаты и принципиальные возможности радиометрической съемки и ускоренных методов анализа образцов минералов и руд на радиоактивность.

Рудник Тюя-Муюн с момента обнаружения там радиоактивных руд привлекал внимание многих исследователей. Однако до середины 20-х годов Тюя-Муюн и прилегающие районы Ферганской области исследовались только геологами (В.Н. Вебер, 1909 г.; И.В. Мушкетов, 1911, 1915 гг.; Д.И. Щербаков, 1924, 1925 гг.). Проведенные Г.О. Ерчиковским, А.П. Кириковым, В.И. Барановым радиометрическая съемка и измерения радиоактивности воздуха в этом районе привели к обнаружению ряда других залежей радиоактивных минералов. А.П. Кириков провел там измерения с целью поисков рудных тел, закрытых четвертичными отложениями. В.И. Баранов (1928) значительно усовершенствовал методику измерений: содержание эманации радия он определял и по степени ионизации почвенного воздуха и по степени поглощения излучений специальными металлическими экранами, окружающими измерительный прибор.

В последующие несколько лет эманационный способ поисков радиоактивных руд был достаточно хорошо отработан и широко применялся в нашей стране. Были выпущены полевые приборы для радиометрических измерений и специальные наставления для работы с ними (Граμμαков, 1933).

Поскольку полученные в результате радиометрической съемки данные давали лишь относительные представления о распределении радиоактивных излучений на земной поверхности или в близких к ней слоях, радиометрическая разведка в то время была рекомендована только для исследования и изучения месторождений радиоактивных руд.

По сравнению с результатами советских исследователей новым и важным было указание Р. Амбронна (Ambronn, 1926) о замеченной им повышенной радиоактивности почвенного воздуха не только в местах выхода жильных месторождений на поверхность, но и в местах, не связанных с радиоактивными рудами. Будучи геологом, он предположил, что повышенная радиоактивность почвенного воздуха могла быть связана с нарушениями в земной коре, в частности в местах сбросов. Повышение радиоактивности почвенного воздуха в этих случаях являлось, по его

мнению, результатом скопления радиоактивных веществ и продуктов их распада вследствие вторичной перегруппировки во время происходивших тектонических процессов.

Х. Хелмс первым провел измерения радиоактивности почвенного воздуха в районах месторождений не только радиоактивных, но также железных и свинцовых руд. В районе свинцового месторождения он отметил повышение радиоактивности, а железорудного — резкое понижение (Helms, 1924).

Замечательное наблюдение Р. Амбронна, подкрепленное измерениями Х. Хелмса, было понято значительно позднее, когда в конце 50-х и в 60-х годах многочисленные исследователи разных стран выяснили, что радиоактивная разведка нефтяных и газовых месторождений должна быть ограничена выявлением только структур, связанных с различными нарушениями, независимо от содержания в них какого-либо полезного ископаемого.

Р. Амбронн и Х. Хелмс отметили сильную поглощающую способность горных пород к радиоактивным излучениям. По их мнению, практическую ценность измерения степени ионизации проб почвенного воздуха могли представлять только как методы выявления выходов радиоактивных руд на поверхность. Даже самое богатое месторождение не могло быть обнаружено по таким вторичным признакам, как ионизация альфа-излучением почвенного воздуха, если рудное тело покрыто хотя бы самыми незначительными наносами.

С развитием техники измерений и регистрации радиоактивных излучений совершенствовались и методы радиометрической съемки. Исследования альфа-излучения проб почвенного воздуха в ионизационных камерах были заменены в 30-х годах регистрацией гамма-излучения счетчиками Гейгера—Мюллера, а в 40-х годах стали применяться более чувствительные сцинтилляционные счетчики. Тогда же вместо тяжелых переносных установок стали устанавливаться на автомашины новые специальные гамма-радиометры, а несколько лет спустя в США, Канаде и Англии начали разрабатываться радиометрические методы поисков урана с самолетов и вертолетов. Через десять лет аэроадиометрические методы уже были обычными рабочими поисковыми методами.

Только за один 1954 г. в Техасе (США) аэрометодами была обследована на радиоактивность площадь около 240 тыс. км² (Kellog, 1956). А в северо-западных районах Канады за тот же год было проведено 74 тыс. пог. км аэрогеофизических полетов (Gregory, 1955). Для определения общих закономерностей распределения гамма-поля проводилась региональная съемка с высоты 150—200, иногда 300 м. По полученным данным выбирались районы повышенного значения гамма-поля и затем производился вновь облет этого района по сгущенной сетке, но уже на меньшей высоте — порядка 60—80 м, а на особенно перспективных участках — даже на минимально возможной для вертолетов высоте — 15—30 м.

В программу аэроадиометрической съемки территории начиная с 50-х годов стали включать исследования магнитного и геоэлектрического полей.

Комплексирование геофизических методов дало возможность попутно с поисками урана и радиоактивных соединений обнаружить при региональной съемке и месторождения других полезных ископаемых. Так, в США были обнаружены месторождения полиметаллических и железных руд (Cook, 1954).

Таким образом, зародившаяся в начале 20-х годов радиометрическая съемка за очень короткий срок превратилась в особое важное направление в геофизической разведке.

В настоящее время разведка месторождений радиоактивных минералов и руд проводится исключительно методами, основанными на регистрации радиоактивных излучений. При проведении разведочных работ регистрируется также общая радиоактивность земной коры, изучение которой дает представление о гамма-поле Земли.

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВЫХ ВОД

Нефтяные пластовые воды являются частью нефтяного месторождения и представляют собой многокомпонентные сложные растворы минеральных солей, органических веществ и газов в системе "горные породы—природные воды—нефтяные пластовые воды—нефтяная залежь".

По мере накопления знаний о химическом составе и особенно о содержании радиоактивных элементов в нефтяных пластовых водах и нефтемещающих породах становились все более понятными некоторые геохимические процессы.

Сохранение в пробах пластовой воды глубинных условий (температуры, давления), химического состава и изотопного равновесия дает возможность получить ценную и надежную информацию с глубин, недоступных никаким другим способам и методам изучения земной коры. Поэтому В.И. Вернадский подчеркивал, что результаты исследований пластовых вод нефтяных месторождений при бурении и эксплуатации скважин могут служить "средством познания и овладения той силой природы, необходимость которой для нас не подлежит сомнению" (Вернадский, 1932, с. 69).

На основе исследований состава нефтяных пластовых вод формировались новые научные направления и даже самостоятельные научные дисциплины. Так, исследования состава нефтяных пластовых вод, проводимые в первые десятилетия нашего века в связи с изысканием практических методов максимального извлечения нефти из пластов и методов борьбы с обводнением скважин, помогли пониманию механизма взаимодействия нефтяных вод и горных пород, условий формирования разнообразных типов вод и привели к созданию в начале 30-х годов в недрах нефтяной геологии особой дисциплины — гидрогеологии нефтяных и газовых месторождений.

Совершенствование методов и техники анализа пластовых вод дало возможность определять в них содержание не только радия и мезотория, но и их прародителей — урана и тория, а после 50-х годов и изотопов водорода — дейтерия и трития. Так возникла геохимия радиоактивных элементов пластовых вод нефтяных и газовых месторождений.

При разработке первого метода радиоактивного каротажа, заложившего основы ядерной геофизики — науки, представляющей собой ядерно-геофизическое направление исследований нефтяных и газовых скважин, была использована замеченная при исследовании радиоактивности пластовых вод разница в естественном гамма-излучении пористых нефтяных песков и плотных глин, характерных для разреза нефтяных скважин.

История изучения радиоактивности нефтяных пластовых вод охватывает широкий круг вопросов от ядерной физики до гидрогеологии и нефтяной геологии и выходит далеко за пределы основной темы. В данной главе приведены только основные этапы, оказавшие непосредственное влияние на создание методов ядерной геофизики.

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА НЕФТЯНЫХ ВОД В 20-Х ГОДАХ

Особенности изливающейся вместе с нефтью воды были замечены еще в XVIII в. В 1862 г. американский химик Г. Стирен впервые определил химический состав нефтяных пластовых вод. Ему удалось выявить в водах растворенные металлы, йод, бром, хлор¹. Он достаточно убедительно показал, что компоненты, обнаруженные им в нефтяных водах, могли быть принесены в течение длительных геологических и, как мы теперь называем, геохимических процессов. Работы Г. Стирена опровергли господствовавшие в XIX в. представления о происхождении многих элементов в природных водах, в частности об их поступлении из осадка солей.

Первые исследования состава нефтяных вод в России относятся также к XIX в. В. Эйхлер в 1874 г. опубликовал данные о химическом анализе вод, выделяющихся вместе с нефтью в районе Балаханы (Азербайджан).

В последующие десять лет (70–80-е годы XIX в) в журнале Русского физико-химического общества стали систематически появляться сообщения о химическом составе вод, связанных с нефтяными залежами. Известный русский химик Л.Н. Потылицын, проводя многочисленные исследования, обнаружил некоторые общие, присущие только нефтяным водам свойства. Он обратил внимание на отсутствие в этих водах солей серной кислоты, характерных для большинства природных вод, и, сравнивая соленые пластовые и современные морские воды, впервые указал на существенное различие в их химическом составе (Потылицын, 1882, 1883).

К концу XIX в. интерес к изучению состава нефтяных пластовых вод заметно возрос. К этому периоду относится первый скачок в развитии нефтедобывающей техники, обеспечивший бурный рост нефтяной промышленности. Вместо неглубоких колодцев стали бурить нефтяные скважины и откачивать нефть с помощью насосов. По мере роста глубин нефтяных месторождений, доступных новым способам бурения и добычи нефти, возрастала необходимость наблюдений и за пластовыми водами. В процессе эксплуатации изменение в составе и количестве сопутствующих вод могло означать начало обводнения нефтяной скважины или указывать на аварийное состояние — прорыв вод из других горизонтов, в результате чего на поверхность вместо нефти поступала в основном вода. Изучением состава нефтяных пластовых вод вынуждены были заняться геологи и промысловые работники. Сначала все наблюдения сводились к тому, чтобы вовремя заметить изменение режима работы каждой скважины и

¹ На основе химического анализа нефтяных пластовых вод, взятых из скважин разных месторождений, Г. Стирен ввел новое в химии понятие "растворенные элементы".

предотвратить ее гибель. С этой целью время от времени проводились и химические анализы пластовых вод. Среди первых работ по исследованию состава нефтяных вод следует отметить следующие.

В 1903 г. в Трудах Бакинского отделения Русского технического общества в связи с работой тампонажной комиссии в Баку была опубликована статья М.М. Галлая о составе и происхождении пластовых вод. В последующие годы в том же журнале появились статьи А.Т. Предита (1906) об исследованиях воды и ее роли в качестве спутника нефти и углеводородных газов, Н.И. Андрусова (1908) о происхождении и залегании нефти с указанием роли пластовой воды, Л. Мелик-Нубарова (1911) об истощении нефтеносных пластов на Биби-Эйбате. Уделяли внимание изучению нефтяных вод К.П. Калицкий, Г.В. Абих, Г. Гофер, В.Н. Вебер, С.И. Миронов. Сравнивая состав пластовых вод и взятых из поверхностных источников на Челекене, С.И. Миронов заметил между ними определенное сходство: отсутствие сернокислых солей, преобладание хлористых соединений, малые колебания в содержании ионов хлора, магния, натрия, что дало ему основание предполагать возможность существования генетической связи между ними.

В выяснении происхождения нефтяных пластовых вод большое значение имели исследования К.В. Харичкова. Он пытался найти общие закономерности изменения состава вод, поднимающихся вместе с нефтью на поверхность (Харичков, 1906б). На промыслах Грозного им было замечено, что состав вод меняется с глубиной в сторону уменьшения степени минерализации и изменения количества сернокислых солей (Харичков, 1913).

В работах по исследованию состава нефтяных вод начала XX в., проводимых выборочно с целью изыскания путей сохранения скважин, не было широких обобщений. Л.Н. Потеялицыну, К.В. Харичкову, С.И. Мионову и другим удавалось подметить только некоторые стороны общих закономерностей, которые могли помочь им определить дальнейшие направления поисковых работ и установить режим отбора нефти.

Первое достаточно широкое обобщение исследований состава пластовых вод на площади Балахано-Сабунчино-Раманинского нефтеносного района провел М.В. Абрамович (1912). По заданию съезда нефтепромышленников на специально отпущенные средства для выработки мер борьбы с обводнением скважин он провел тщательные систематические и многочисленные анализы состава и количества пластовых вод. Даже по полученным им данным было не просто установить пласты, из которых увеличился приток вод, поскольку сопоставление химических анализов выявило большое разнообразие в их составе. Степень минерализации и жесткость резко различались не только между водами в разных скважинах, но и между горизонтами одной и той же скважины. В разных количествах были замечены соли углекислых, хлористых, иодистых соединений, бикарбонаты металлов. Впервые в пластовых водах был обнаружен стронций (дополнительные исследования показали присутствие стронция в песках всех горизонтов продуктивной толщи).

Общими свойствами всех пластовых вод этого района были щелочная реакция и отсутствие сернокислых солей. М.В. Абрамович указал не толь-

ко на характерные особенности изменения состава вод с глубиной. По его данным, в водах более глубоких пластов при общем уменьшении минерализации, отмеченном ранее другими учеными, изменялось соотношение между отдельными химическими соединениями: возрастала доля кальция по сравнению с магнием, увеличивалось содержание наftenовых кислот. Многообразие состава пластовых вод он связывал с определенными горными породами, встречающимися в разрезе нефтяных скважин. М.В. Амбровичу удалось установить динамику изменения состава и количества вод и разработать предложения, осуществление которых дало возможность сохранить многие скважины в этом богатейшем нефтяном районе.

В том же году геолог Д.В. Голубятников (1912) начал обработку многочисленных анализов пластовых вод месторождения Сураханы.

Работы М.В. Амбровича и Д.В. Голубятникова, обсуждение все более учащающихся случаев обводнения и гибели скважин доказали необходимость постоянных наблюдений за составом вод и нефти непосредственно на промыслах. Это было настолько очевидно, что нефтепромышленники пошли на дополнительные затраты по организации специальной нефтепромысловой аналитической лаборатории. Первая в России нефтепромысловая химическая лаборатория была открыта в 1914 г. при Геологическом бюро Бакинского общества русской нефти в районе Биби-Эйбата. С этого времени у нас в стране начали более или менее регулярно проводиться анализы пластовой воды. В первые годы существования лаборатории анализы такого рода осуществляли химики Рейснер и Блинков. Систематические же исследования нефтяных пластовых вод непосредственно на промыслах были организованы только после 1917 г.

Геологам изучение состава пластовых вод помогло разобраться в сложном строении Апшеронского полуострова. Д.В. Голубятников в районах Сураханы и Биби-Эйбат по составу пластовых вод смог составить представление о строении продуктивной толщ. Он впервые доказал самостоятельное существование водоносных пластов в разрезе и выделил четыре типа пластовых вод, связанных с глубинами залегания нефтяных залежей (Голубятников, 1916). Уменьшение общей минерализации пластовых вод с глубиной и увеличение содержания в них углекислоты, крайне однообразный состав вод, по его мнению, "гармонизируют по условиям залегания с составом продуктивной толщ", но возможно насыщение песков этой толщ также водами, поднимающимися с еще больших глубин. Тогда же Д.В. Голубятников предложил для обозначения вод определенного химического состава, связанных с одними и теми же пластами, термин "ископаемые воды".

Несколько неожиданными и даже противоречащими установившимся в то время взглядам оказались выводы Д.В. Голубятникова о происхождении и возрасте вод Челекена. Он показал, что нефтяные пластовые воды в этом районе стали солеными сравнительно недавно и, следовательно, не за счет морского происхождения нефтяных пластов, как это долгое время утверждал Г.В. Абиx, а в результате иных сложных процессов, поскольку продуктивная толща здесь сложена пресноводными слоями (Голубятников, 1916). В связи с этим пришлось коренным образом изменить направ-

ление разведки, а это в свою очередь способствовало открытию в последующие годы на Челекене новых месторождений.

Следует отметить, что в других странах, особенно в США также занимались изучением состава и происхождения нефтяных пластовых вод. В 1917 г. вышла статья американского геолога Дж. Роджерса об исследованиях нефтяных вод. В Советском Союзе она стала известна только в 1924 г.¹ Дж. Роджерс, как и Д.В. Голубятников, обработал огромное количество анализов пластовых вод многих месторождений Америки. Среди них встречались воды соленые и слабо соленые. Концентрация хлоридов в них, по его мнению, зависела главным образом от местных условий залегания нефтяной залежи, т.е. от окружающих пласт горных пород, и не была связана с положением воды по отношению к нефти.

Это положение, впервые четко сформулированное Дж. Роджерсом, было впоследствии подтверждено работами крупнейших советских исследователей — Л.В. Комлева (1931), В.А. Сулина (1935, 1948), В.И. Вернадского (1935).

Процесс формирования состава нефтяных пластовых вод Дж. Роджерс представлял так: большая часть морской воды древнего периода выжимается в процессе отвердевания и сжатия. Происходит циркуляция воды — атмосферные осадки, проникая с земной поверхности, оттекают в более глубокие части соленую воду, которая на своем пути может оказаться в закрытых песчаных (морского или пресноводного происхождения) линзах, благоприятных и для скопления нефти. Оставаясь в своего рода ловушках неопределенно долгое время, вода при соприкосновении с окружающими горными породами изменяется. Таким образом, в пластовых водах отражаются характерные признаки этих горных пород, и в общем случае по химическому составу пластовых вод возможно определить их происхождение.

Разнообразие состава нефтяных пластовых вод, неожиданное появление в некоторых из них редких элементов и отсутствие широко распространенных сульфатных соединений привлекали внимание ученых. Интерес представляли совершенно неизвестные химические процессы, которые могли иметь место при формировании их состава в естественных условиях высоких давлений и температур. Тогда же были предприняты попытки моделирования возможных процессов на природных образцах. В отчете Комиссии по изучению производительных сил России была опубликована работа известного химика Н.С. Курнакова по определению солевого равновесия в природных рассолах и водах (Курнаков, Жемчужный, 1917). Он же в Институте физико-химического анализа занимался изучением поведения отдельных элементов и соединений в природных водах (Курнаков, Опыхтина, 1927). Но самое пристальное внимание химиков и физиков было уделено содержанию радия и радиоактивных элементов в нефтяных пластовых водах.

¹ В специальной библиотеке по всем отраслям нефтяного дела, издававшейся журналом "Нефтяное и сланцевое хозяйство", вышла в русском переводе отдельной книгой работа Дж. Роджерса "Химические соотношения вод нефтяных месторождений" (М., 1924).

Все началось с сенсационного открытия повышенного содержания радия в пластовых водах Гейдельбергской скважины в 1919–1921 гг. С самого начала бурения разведочной скважины предусмотрительные владельцы проводили систематические анализы состава буровых вод. Исследовалась специально и их радиоактивность с целью возможного их использования в качестве лечебных¹.

В начале бурения поступающая из верхних горизонтов вода была самой обычной, с ничтожно малым содержанием радия. Неожиданно на глубине 998 м после пересечения битуминозной толщи и сбросовых трещин обнаружился сильный приток горячей и минерализованной воды. В ее сухом остатке, по анализу А. Бекера, содержалось 8,8 % радия, а в самой воде $(1,74 \div 1,79) \cdot 10^{-10}$ г/л, т.е. почти в тысячу раз больше, чем в других природных водах. Сильно радиоактивным оказался и сопутствующий газ, в котором установили 49 эман/л радона и около 0,65% гелия.

Необыкновенно высокая радиоактивность пластовых вод Гейдельбергской скважины сразу же была объяснена немецким геологом В. Саламоном вымыванием радия из богатых радием горных пород, залегающих вблизи скважины. Только благодаря счастливому стечению обстоятельств — закладке буровой скважины именно в этом месте — удалось обнаружить, говорил он, столь уникальное и, вероятно, неповторимое явление. Объяснение В. Саламоном происхождения высокой радиоактивности пластовых вод было принято без возражений. Авторитет его был настолько велик, что никто даже не попытался проверить состав вод других месторождений и определить в них содержание радия. Действительно, в последующие годы ничего похожего не встречалось в практике геологической разведки. Высокая радиоактивность пластовых вод Гейдельберга оставалась единственным в этом роде открытием.

В нашей стране наблюдение за составом нефтяных пластовых вод сопровождалось определением радия или других радиоактивных элементов только на нефтепромыслах Баку, а в других нефтяных районах такие измерения проводились только от случая к случаю; полученные материалы почти не обрабатывались.

Изучение состава и происхождения нефтяных пластовых вод стало острой проблемой в период восстановления народного хозяйства молодой Советской республики после Великой Октябрьской социалистической революции. Хищническая эксплуатация русскими капиталистами нефтяных месторождений в царской России привела к катастрофическому обводнению нефтяных скважин. Оборудование нефтяных промыслов Баку и Грозного было во многом разрушено, а оставшееся безнадежно устарело. Нужно было принимать экстренные меры, чтобы удовлетворить топливный голод в стране. Решающую роль в восстановлении

¹ В начале XX в., после открытия явления радиоактивности, проводились многочисленные исследования радиоактивности многих минеральных источников (Дж. Дж. Томсон, 1902 г.; Химстедт, 1905 г. и др.). В течение нескольких лет было собрано большое число данных о содержании радиоактивных элементов и газов в природных водах, в основном с целью их возможного терапевтического использования.

нефтяной промышленности сыграл И.М. Губкин (1922), наметивший конкретные меры борьбы с обводнением скважин. Важным последствием его работы было введение на всех нефтяных промыслах Советского Союза обязательного наблюдения за составом и количеством нефтяных вод и организация соответствующих промысловых лабораторий. С этого времени не прекращаются систематические исследования нефтяных пластовых вод, результаты которых используются прежде всего для установления режима отбора нефти из скважин, контроля за закачкой воды и газа в пласт и при решении многих других задач нефтепромысловой геологии.

ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНЫХ НЕФТЯНЫХ ВОД В СССР

В начале 20-х годов изучение состава нефтяных пластовых вод проводилось только для решения практических задач добычи нефти и не связывалось с возможностью найти новый источник добычи радия. Поисками радиоактивных минералов и руд занималась Радиевая комиссия Академии наук. Во многие районы были направлены экспедиции и геологические партии для разведки и изучения радиоактивности горных пород и редких газов. Особенно тщательно исследовались условия выхода гелия и других газов, являющихся продуктами распада радиоактивных элементов. Проводились работы в районе рудника Тюя-Муюн и на севере нашей страны — в Печорском крае, поскольку еще в XIX в. там были найдены радиоактивные минералы. В конце лета 1926 г. один из участников экспедиции — А.А. Черепенников, проводя поиски редких газов, заметил, что из заброшенной "казенной" буровой скв. 1 бывших нефтяных промыслов на р. Ухта вместе с горючими газами изливается не совсем обычная вода, образующая какой-то особый красный осадок (Черепенников, 1928). Он взял несколько проб газа и воды. Анализ первой же пробы воды, сделанный Л.Н. Богоявленским (1928) в апреле 1927 г. в г. Ленинграде, указал на невиданно большое содержание радия — около $5 \cdot 10^{-9}$ г/л, значительно большее, чем в водах знаменитой Гейдельбергской скважины и примерно в пять раз большее, чем в подземных рассолах богатейшего месторождения радия Иохимовсталь в Чехословакии. Следовало как можно быстрее выяснить запасы радиеносной воды. В случае стабильности высокого содержания радия буровую скв. 1 можно было бы считать промышленным месторождением радия нового типа.

Как только стали известны результаты первых анализов проб воды, на Ухту выехали радиологи, геологи и другие специалисты из различных организаций, поскольку уже в то время интерес ко всем источникам радия и радиоактивных элементов был велик¹. Была организована радиометрическая съемка довольно обширной территории в этом районе, обследованы на радиоактивность все естественные водные источники (реки, озера, нефтяные пластовые и другие подземные воды), а также природные газы.

¹ Первые радиологические исследования на Ухте проводили радиологический отдел Института прикладной геофизики (А.А. Ломакин) и радиологическая лаборатория Главной палаты мер и весов (Л.Н. Богоявленский).

Прежде чем выяснить запасы радия, необходимо было получить ясные ответы на вопросы, за счет чего и каким образом пластовые воды оказались им обогащенными. И хотя Ухтинский район — один из самых старых районов добычи нефти — был достаточно хорошо изучен, ответ на эти вопросы нельзя было дать сразу. Месторождение, по данным геологов, представляло собой ненарушенный правильный купол; продуктивные пласты состояли в основном из песчаников, подстилавшихся древними сланцами. Весьма странным обстоятельством было то, что радиесодержащая вода вытекала только из одной скважины. Поскольку доступными в то время средствами точно определить источник обогащения воды было невозможно, высказывались многочисленные обоснованные и совершенно необоснованные гипотезы, как и по поводу высокой радиоактивности вод Гейдельбергской скважины.

Химики-радиологи Л.Н. Богоявленский и А.А. Ломакин сначала предположили, что причиной радиеносности являются неизвестные богатые радиоактивные руды, залегающие ниже продуктивных нефтяных пластов. Затем они выдвинули версию о выщелачиваемости радия сульфатными пластовыми водами из первичных урановых и ториевых руд кристаллического фундамента, последующем его восстановлении бактериальными процессами и далее — переводе радия в растворимые соединения (Богоявленский, Ломакин, 1928).

Исследования происхождения радия в нефтяных пластовых водах Ухты Геологический комитет поручил радиологической лаборатории Московского государственного университета под руководством профессора В.И. Баранова. Была проведена новая серия анализов. Внимание привлекло несоответствие в содержании бария и радия в воде и осадке. Этой разницы не должно было быть, если они, как тогда считалось, попадали в воду и осадок во время одного и того же геохимического процесса. Замеченное несоответствие — выдвинул новую гипотезу В.И. Баранов — может означать, что они поступали в воду и осадок в результате разных процессов. Проверить это предположение было хотя и трудно, но возможно, если допустить, что доли выделения в осадок бария и радия совместно с окисью железа, обнаруженных в осадке, оставались постоянными. В пробах воды, отобранных А.А. Черепенниковым и П.Т. Соколовым в 1927 г., при таком допущении должно было быть радия в 200 раз больше, а бария в 40 раз меньше, чем в осадке, что и подтвердилось измерениями (Баранов, Курбатов, 1933).

В пробах ухтинской воды В.И. Баранов (1933) обнаружил мезоторий, радиоторий и торий. Мезоторий составлял $2,1 \cdot 10^{-11}$ г/л, радиоторий — 4% в воде и 6% в осадке от равновесного состояния его с мезоторием, из которого он в основном образовывался. Торий-X был обнаружен в воде в количестве, в десять раз превышающем его равновесное состояние с радиоторием и составляющем около 60% от равновесного с мезоторием.

Полученные результаты свидетельствовали о различии процессов обогащения радием пластовых вод и осадка этих вод, но не содержали никаких указаний на возможный источник обогащения. Радий мог поступать в воды и осадок и из неизвестных залежей радиоактивной руды, и в результате сложного геохимического процесса. Некоторую помощь в

выяснении этих вопросов могло оказать определение соотношения других радиоактивных элементов. В.И. Баранов предположил, что могла существовать исходная погребенная вода, в которой уран и торий могли быть связаны одинаковым образом, поскольку вода вымывала из пород равные части радия и мезотория. Отношение урана к торию в ухтинской воде составляло 2,65, как и для большинства горных пород, не содержащих повышенных количеств ни радия, ни тория, ни урана. Отсюда следовал закономерный вывод, что исходная вода становилась радиоактивной за счет неизвестных еще геохимических процессов, а не в результате вымывания радиоактивных элементов из радиоактивных руд. Необходимо было выяснить относительное содержание радиоактивных элементов в других районах. Если полученное соотношение подтвердится и там, то предположение В.И. Баранова можно считать обоснованным. Обогащение радием пластовой воды происходило за счет исходной погребенной воды, в которую радиоактивные элементы поступали из обычных горных пород, при этом величина отношения урана к торию должна оказаться постоянной для земной коры в целом.

Выяснение вопроса о происхождении радиеносной ухтинской воды несколько задержало поиски аналогичных источников добычи радия в этом районе. Следует отметить, что со временем высокое содержание радия в водах скв. 1 не только не снижалось, но в последующие два года даже повысилось. В пробе, взятой через год, радия было $7,4 \cdot 10^{-9}$ г/л, а наибольшее его содержание по данным Главной палаты мер и весов составляло $7,6 \cdot 10^{-9}$ г/л (Богоявленский, 1928). Из ухтинской радиеносной воды тогда же была начата промышленная добыча радия: с помощью специальной кислотной обработки создавались водные концентраты и доставлялись в Радиевый институт в Ленинграде, а там из них извлекался чистый радий.

После обнаружения радия в нефтяных пластовых водах Ухты началось интенсивное изучение радиоактивности нефтяных и поверхностных вод: проводились количественные измерения содержания в них радиоактивных элементов: радия, урана, тория; определялось их соотношение, выяснялось по химическому составу вод их возможное происхождение, связь с окружающими горными породами, определялся их возраст и т.п.

НАЧАЛО СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОАКТИВНОСТИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВЫХ ВОД

В конце 1929 г. появилось сообщение о "совершенно исключительном количестве радия" в пластовых водах Новогрозненского нефтяного района (Тверцын, Милин, 1929). Сразу же в Грозный направились представители Радиевого института. В их работе приняли участие и специалисты физического отдела Грозненского нефтяного научно-исследовательского института. По данным Б.А. Никитина (Никитин, Комлев, 1930), в пластовых водах Грозного содержалось $1,83 \cdot 10^{-9}\%$ радия. Пластовые воды Грозного оказались богаче, чем воды Гейдельберга ($1,79 \cdot 10^{-10}\%$) и Ухты ($0,74 \cdot 10^{-9}\%$). В Грозном, по подсчетам Б.А. Никитина, ежегодно выносилось

на поверхность около 0,3 г радия, т.е. примерно столько же, сколько добывают в год на радиевых рудниках в Конго.

На средства Союзнефти в течение трех—четырёх лет проводились исследования пластовых вод специальными радиометрическими группами и партиями, в работе которых приняли участие специалисты из Радиевого института и из Института прикладной геофизики. К сожалению, вскоре приток радиоактивной воды из пласта XIII почти прекратился. В других скважинах, где также было отмечено повышенное содержание радия, количество поступающего на поверхность вместе с пластовой водой радия также резко уменьшилось: в водах скважины "Кочегарка" радий сократился почти в 300 раз: с $5,82 \cdot 10^{-9}\%$ в 1929 г. до $2 \cdot 10^{-12}\%$ к декабрю 1930 г. (Комлев, 1931). За полтора года непрерывных наблюдений было отмечено понижение содержания радия до обычных количеств.

С целью поисков исчезнувших радиеносных пластовых вод были приняты в широком масштабе исследования радиоактивности всех природных вод, поскольку не исключалась возможность оттока глубинных вод по пласту к другим скважинам, бурившимся в то время в большом количестве и, по всей вероятности, изменявшим гидрогеологический режим района (Баранов, Курбатов, 1931).

При сравнении химического состава радиеносных нефтяных пластовых вод Ухты и Грозного была отмечена существенная разница. В ухтинских водах барий находился в заметных количествах, а сульфатный ион отсутствовал, а в грозненских, наоборот, не было бария, а сульфатный ион наблюдался в большом количестве.

На эту и некоторые другие особенности вод разных районов обратил внимание В.И. Вернадский. Анализируя причины изменения химического состава пластовых вод в процессе образования нефтяной залежи и при ее разработке, он попытался найти связь повышенной радиоактивности нефтяных пластовых вод с некоторыми общими закономерностями радиоактивности земной коры. Открытие радия в нефтяных водах Грозного, по мнению В.И. Вернадского (1930, с. 399), заставило "в сильной степени углублять и менять то представление об его истории, которое мы сейчас имеем". Он считал, что радий в буровых водах нефтяных месторождений сконцентрирован в новой, чрезвычайно интересной и важной форме, требующей немедленного и детального разрешения (Вернадский, Хлопин, 1932). С целью изучения этой новой формы концентрации радия были предприняты детальные обследования пластовых вод в нефтяных районах Баку, Челекена, Туркмении и Ферганской области.

Формы концентрации радия в нефтяных пластовых водах оказались весьма разнообразными. Изучение особенностей химического состава пластовых вод и продуктивных горизонтов, с которыми связана повышенная радиоактивность вод, помогло составить общее представление о схеме протекавшего геохимического процесса.

В Бакинском нефтеносном районе в 1930—1931 гг. были обследованы на радиоактивность пластовые воды нефтепромыслов Балаханы, Сабунчи, Раманы, Сураханы, о-ва Артема и образцы из разведочных скважин Кара-Ухур и Хурдалан. В районе Биби-Эйбата повышенное содержание радия $(0,5 \div 9,5) \cdot 10^{-11}$ г/100 см³ воды было обнаружено в водах двух

горизонтов продуктивной толщи, распространявшейся на большой площади (Никитин, Меркулова, 1933). С глубиной концентрация радия в водах снижалась, повторяя ход минерализации пластовых вод, и соответственно уменьшалось содержание хлора и щелочноземельных элементов. Содержание радия, по-видимому, не зависело от химического состава пластовых вод, так как в водах одного и того же пласта радий находился в разных количествах. Более того, в одной скважине при почти стабильном химическом составе воды количество радия за 16 месяцев уменьшилось почти на 40%.

В Грозном концентрация радия в водах также уменьшалась со временем, но в отличие от Баку в более глубоких водах количество радия, наоборот, увеличивалось.

В Дагестане обнаружили большое сходство между составом пластовых вод из скв. 3 промысла Дагестанские огни и источника Дузлак (Комлев и др., 1933). При одинаковом содержании в них кальция в пластовых водах было радия примерно в три, а бария в семь раз меньше, чем в источнике. Радий находился в водах, содержащих большое количество щелочноземельных элементов при малом содержании или полном отсутствии ионов серной кислоты. Так же, как в Баку, с увеличением глубины и появлением щелочных составляющих количество радия в водах уменьшалось (Комлев, 1933).

На основе изучения пластовых вод промысла Дагестанские огни в Радиевом институте установили, что концентрация радия в пластовых водах связана с водами определенного химического состава, сформированного в результате сходных тектонических условий независимо от глубины залегания. На этой основе был даже проведен подсчет запасов радиоактивных пластовых вод, в которых содержание радия составляло сотни граммов чистого элемента и, следовательно, рассолы дагестанских пластовых вод представляли якобы мощную сырьевую базу для добычи радия.

Однако дальнейшие исследования принесли разочарование — при аналогичных, казалось, условиях радий в естественных источниках Северного Кавказа (Чеченская АССР, Кубань и другие районы Дагестана) не был обнаружен.

На Челекене также было замечено некоторое сходство между радиоактивными пластовыми и поверхностными водами, содержание радия составляло $(4,8 \div 6) \cdot 10^{-11}\%$ (Тагеева, Старик, 1931). В Туркмении горячие источники Нефте-Дага и Боя-Дага оказались также радиоактивными (Курбатов, 1931).

Интересны первые результаты исследования радиоактивности нефтяных пластовых вод в Ферганской области, где в водах двух нефтяных горизонтов радий содержался только в несколько повышенном количестве и совершенно не был связан с залежами радиоактивных руд (Хлопин, Никитин, 1930).

Наряду с изучением радиоактивности нефтяных пластовых вод в начале 30-х годов было начато изучение радиоактивности нефти и горных пород продуктивных горизонтов, к которым приурочены радиоактивные воды (Никитин, 1932).

Какие же выводы можно было сделать на основании проведенных в 1929—1932 гг. исследований радиоактивности нефтяных пластовых вод? Прежде всего были основания считать, что радиоактивные нефтяные пластовые воды — явление распространенное, а не уникальное. Природные воды с высоким содержанием радия не всегда можно связывать с нефтяными месторождениями — сходным химическим составом часто обладают воды горячих источников.

Какие же факторы оказывают влияние на повышенное содержание радия в нефтяных пластовых водах? На этот вопрос в то время ответить было невозможно. Было выяснено, что условия формирования нефтяной залежи благоприятствуют в ряде случаев повышенному содержанию радия в пластовых водах. Но вряд ли это могло являться результатом сочетания особых свойств ограничивающих нефтяную залежь горных пород, скорее было связано с химическими или другими свойствами самих вод. Действительно, во всех известных к тому времени радиоактивных нефтяных пластовых и поверхностных природных водах присутствуют в заметных количествах хлор, натрий, кальций, т.е. радиоактивные пластовые воды — это хлор-натро-кальциевые воды нефтяных месторождений.

ПОИСКИ ВОЗМОЖНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ РАДИЕНОСНЫХ ПЛАСТОВЫХ ВОД НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Изыскание новых источников добычи радия из пластовых вод нефтяных месторождений могло быть успешным только в случае решения вопроса о происхождении и генетических связях радиеносных вод с другими пластовыми и природными водами. Однако к началу 30-х годов еще не было выработано единое представление о форме нахождения радиоэлементов в природных растворах. И.Е. Старик считал, что если радиоактивные элементы даже в больших разведениях могли бы проявлять коллоидные свойства, то можно было бы найти пути распределения веществ между растворителями, находящимися обычно в природных условиях в равновесии (Старик, 1930).

В.И. Вернадский (1960) заметил, что радиеносные воды нефтяных месторождений не всегда содержат в преобладающих количествах хлор, натрий, кальций. Стали известны радиеносные воды и некоторых других типов. В.И. Вернадский выделил шесть типов радиеносных пластовых вод нефтяных месторождений в самостоятельные физико-химические системы, активно взаимодействующие с другими природными водами.

Под влиянием работ В.И. Вернадского о природных водах для отдельных нефтеносных районов были сделаны первые попытки выявления типов и генетических связей нефтяных пластовых вод независимо от содержания в них радиоактивных элементов (Басилов, 1934). Совершенно неясен был критерий, по которому можно было подразделять пластовые воды. Предлагалось, например, разделять воды на типы по величине отношения натрия к хлору, которое характеризует процесс изменения состава нефтяных пластовых вод (Маляров, 1934).

Первую сводку материалов по условиям залегания, химическому составу и происхождению пластовых вод нефтяных месторождений СССР дал известный гидрогеолог-нефтяник В.А. Сулин (1935). Он обобщил и систематизировал накопленные на промыслах и только частично обработанные и опубликованные материалы по составу нефтяных пластовых вод. Кроме химических анализов пластовых вод он рассмотрел гидрогеологические данные по отдельным нефтяным месторождениям и районам, представленные ему геологами Б.Б. Порфирьевым, С.И. Мироновым, Б. Султановым, А.И. Косыгиным.

В его работе была подробно показана связь нефтяных пластовых вод с природными водами. Явления выщелачивания горных пород и их засоления, составляющие сущность процессов формирования нефтяных пластовых вод, по В.А. Сулину, соответствуют процессам опреснения, преобладающим при формировании вод суши, и концентрации солей в водах морей и океанов.

В единый генетический тип, группу и подгруппу В.А. Сулин объединял воды различных семейств с учетом их физико-географического и геологического размещения, т.е. как бы разделил воды одного семейства на входящие в него генетические типы, группы, подгруппы. Разделение вод В.А. Сулин проводил по различию солевого состава с учетом геохимических особенностей природной обстановки, которые определяют не только солевой, но и газовый состав нефтяных вод.

В дальнейшем В.А. Сулин (1948) развил положение об условиях образования пластовых вод. В формировании нефтяных пластовых вод он выделил пять главных этапов, в течение которых происходит выщелачивание из горных пород определенных элементов и соединений. На первом, "хлоридном" этапе формирования из пород вымываются магний, натрий и частично сульфаты кальция и магния. На втором — "сульфатном" — сульфаты кальция и магния и остатки хлоридов натрия. На третьем — "гидрокарбонатно-кальциевом" — из пород выщелачиваются карбонаты кальция и магния и остатки хлоридов натрия. На четвертом этапе — "сиаллитовом" — кремнезем и частично полуторные окислы (алюминий и железо). На последнем, пятом этапе — "гидрокарбонатно-натриевом" — происходит вывод из пород гидрокарбонатов и хлоридов натрия и сульфатов натрия и магния.

В.А. Сулин отмечал, что при взаимодействии вод с горными породами происходит не только выщелачивание, но и испарение, конденсация, ионный обмен, поглощение или выделение газов и другие процессы, в результате которых происходит увеличение содержания растворенных веществ (повышение минерализации), выпадение веществ (уменьшение минерализации) или некоторые только качественные изменения воды.

Критерии, определяющие основные типы нефтяных пластовых вод, и методы их графического изображения разрабатывались многими гидрогеологами. Некоторые авторы предлагали принять за основу специфические или особенно важные компоненты состава. Так, получили широкое признание воды, названные В.И. Вернадским "радиеносными". Предлагалось не только выделять солевой состав, но и подразделять его на группы, т.е. подразделять типы вод по группам солевого состава, характерного для

той или иной природной обстановки формирования подземных вод. Высказывалось предложение разделять воды на типы по преобладающим ионам и по соотношению между ними (Алекин, 1954). И, наконец, некоторые исследователи, так же как В.И. Вернадский, предлагали учитывать содержание растворенных или спонтанных газов в пластовых водах (Овчинников, 1955).

По мере накопления знаний о составе нефтяных пластовых вод и динамике его изменения в процессе эксплуатации месторождения постепенно возрастала возможность все более полного уточнения генетических связей в системе горные породы—природные воды—нефтяные пластовые воды—нефтяная залежь, а также оценки состояния месторождения и влияния на происходящие процессы окружающей обстановки, в том числе — подземной газовой среды. Так, по содержанию стронция и брома в пластовых водах определяют степень изолированности и сохранности нефтяной залежи. Нефтяные месторождения, хорошо изолированные глинистыми пропластками и надежно защищенные от кислородного воздействия с земной поверхности, представляют высокую промышленную ценность. В них нефть более легкая, а пластовые воды, обычно, древние, погребенные, часто реликтовые, благодаря застойному режиму, и наиболее концентрированные, но с незначительным содержанием стронция. Количество стронция, как правило, увеличивается по направлению от областей питания к областям разгрузки, что совпадает с направлением движения подземных вод (Герасимов, 1968).

В последнее десятилетие в пластовых водах обнаружены микроэлементы, являющиеся спутниками радиоактивных элементов и руд. По их содержанию можно определить не только тип минерализации воды, но и содержание таких радиоактивных элементов, как уран.

ПЕРВЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА, ТОРИЯ И ДРУГИХ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИЗОТОПОВ. В ПЛАСТОВЫХ ВОДАХ

Радий оставался основным элементом при изучении радиоактивности нефтяных пластовых вод примерно до начала 40-х годов. Уран известными в то время методами практически не мог быть обнаружен. Отдельные попытки определения малых количеств урана в природных водах были мало убедительными из-за недостаточной чувствительности методов. Только после разработки люминесцентного метода исследования впервые в 1934 г. определили содержание урана в морской воде шведские ученые Ф. Гернеггер и Б. Карлик (Hernegger, Karlik, 1937).

В СССР первые сведения об уране в нефтяных пластовых водах Ухтинского месторождения (от $3,7 \cdot 10^{-8}$ до $3,7 \cdot 10^{-7}$ г/л) были опубликованы В.А. Уфковской (1940). Систематическое изучение содержания урана в природных водах, в том числе нефтяных пластовых, было начато в 1947 г. в Радиовом институте АН СССР под руководством И.Е. Старика.

В нефтяных пластовых водах уран был обнаружен в крайне незначительных количествах, причем в некоторых случаях уран вообще не был

выявлен, а содержание радия в них не соответствовало количествам, требуемым радиоактивным равновесием. В нефти же урана содержалось, как правило, больше, чем радия. Однако возможность непосредственной связи между повышенной радиоактивностью нефтяных пластовых вод и нефтью почти полностью отвергалась до начала 50-х годов.

Под руководством И.Е. Старика были исследованы на содержание урана практически все крупнейшие реки и водоемы на территории Советского Союза, а в 50–60 годах исследования геохимии урана и естественных радиоактивных изотопов проводились в водах Черного и Азовского морей, Атлантического и Тихого океанов. Удалось установить широкую миграцию урана в природных водах (35 лет..., 1957). Исследования были направлены на выяснение процесса формирования скоплений урана в виде месторождений осадочного типа.

Присутствие урана, так же как и радия, в нефтяных пластовых и других природных водах, по мнению И.Е. Старика, связано не только с урановой минерализацией, но и с породами, содержащими уран в кларковых (т. е. средних для земной коры) количествах. Выделение урана из этих пород происходит обычно при разрушении кристаллической решетки породообразующих минералов. На земной поверхности такие условия создаются в пустынях и полупустынях с аридным климатом, в земной коре — в зонах тектонических дроблений.

Распределение радиоактивных элементов в нефтяных пластовых водах месторождений Западной Туркмении, Башкирской АССР, Северного Кавказа, Эмбенской нефтеносной области изучалось под руководством Ф.А. Алексеева. В Азербайджане исследования проводили Г.Х. Эффендиев, Р.А. Алекперов, Л.Н. Нуриев. Во всех исследованных районах в пробах пластовой воды был обнаружен торий, присутствие которого опровергло мнение о его выщелачиваемости пластовыми водами и выпадении во время миграции. Было отмечено колебание отношения урана к торию для различных типов нефтяных пластовых вод, которое, по мнению Ф.А. Алексеева, связано в основном с изменениями в содержании урана, а не тория (Алексеев, Готтих, Воробьева, 1968).

Уран и торий в пластовых водах были обнаружены и американскими учеными в водах нефтяных месторождений в юго-западном Канзасе и северо-восточной Оклахоме (Hyden, Danilchik, 1962). Однако присутствие урана в водах, по их мнению, не должно было влиять на повышенную радиоактивность пластовых вод, которую они связывали только с содержанием радия.

К началу 70-х годов в нефтяных пластовых водах были определены как уран и торий, так и их дочерние элементы — радий, радон, мезоторий-I и торий-X. Было установлено, что количественное их распределение в водах зависит от геохимических особенностей каждого месторождения, главным образом от особенностей химического состава или типа пластовых вод и вмещающих пород. В водах гидрокарбонатно-натриевого типа также может происходить процесс выщелачивания урана, а в хлоридно-натриево-кальциевого типа — радия. В табл. 1 приведено сравнение содержания урана и радия в океанических и пластовых водах нефтяных месторождений.

Таблица 1

**Количественное распределение радиоактивных элементов
в нефтяных пластовых водах
(по Г.Х. Эффендиеву и др., 1964)**

Элемент	Пластовые нефтяные воды		Океаническая вода
	щелочные	жесткие	
Уран, %	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Радий, %	$7 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-14}$
Радон, кюри/мл	$2 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	—
Мезоторий-I, г-экв. тория/л	$0,3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	—
Торий, г/л	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	—
Торий-X, г-экв. тория/л	$3 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	—

Ф.А. Алексеевым (Алексеев и др., 1958; Алексеев, Готтих, Воробьева, 1968), Г.Х. Эффендиевым (1964) и другими было установлено, что в водах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом происходит окисление четырехвалентного урана до шестивалентного, который хорошо растворим в воде, и в таких зонах уран горных пород легко переходит в раствор. Поэтому относительно повышенное количество урана и сравнительно низкое — радия содержится в подземных водах свободного водообмена и в поверхностных водах, например, в морях и океанах. Для хорошо изолированных нефтяных залежей характерны высокая минерализация, застойный режим и восстановительная обстановка. В таких условиях обычно формируются хлор-кальциевые пластовые воды, которые являются наиболее благоприятными для выщелачивания радия из вмещающих пород и накопления его в пластовых водах. Уран при этом восстанавливается до четырехвалентного и, гидролизуясь, выпадает в осадок. Поэтому пластовые воды изолированных нефтяных пластов и месторождений обычно обеднены ураном и обогащены радием. Таким образом, природная обстановка, благоприятствующая сохранению нефтяной залежи, в то же время способствует формированию радиеносных нефтяных пластовых вод.

В 50–60-х годах кроме определения радиоактивных элементов в пластовых водах усилились исследования и их изотопного состава. Были обнаружены некоторые микроэлементы—спутники радиоактивных элементов. Выявлять спутники иногда бывает проще, чем сами элементы, поскольку они определяются обычными химическими методами. Отношения радиоактивных элементов урана-234 к урану-238, мезотория-I к радю, тория к ионию и другие стали широко использоваться для поисков радиоактивных пластовых вод и даже в ряде случаев для поисков месторождений радиоактивных минералов и руд.

В это же время стали проводиться исследования содержащихся в пластовых водах тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития. Естествен-

ное изотопное фракционирование водорода в различных физико-химических превращениях неодинаково по величине и знаку. Поэтому количественные определения изотопов этого наиболее распространенного в природе элемента могут служить критерием участия пластовой воды в геохимических процессах.

Изучение распределения дейтерия в природных водах (Сойфер, Егоров, 1966; Рачинский, 1972) показало весьма незначительные колебания этого изотопа в пластовых и поверхностных водах. Так, в пластовых водах дейтерий обнаружен в пределах от 1,08 до 1,11 отн. ед., а в поверхностных — от 0,88 до 1,01 отн. ед. Сопоставление количественных данных убедительно показало, что по содержанию дейтерия можно достаточно надежно определить происхождение пластовых вод. Повышенное содержание дейтерия в пластовых водах может быть связано не столько с палеоклиматическими и палеогидрохимическими особенностями глубинных вод и горных пород, сколько с повышенным содержанием дейтерия в инъецированных составляющих (Рачинский, 1972). Действительно, особенности изотопного состава исследованных пластовых вод, например, Апшеронского полуострова не являлись функцией стратиграфии, а оказались явлением сугубо местным и вторичным, которое проявилось на общем изотопном фоне при воздействии пришлых щелочных вод. Таким образом, точные количественные измерения дейтерия в пластовых водах помогли установить медленно протекающий процесс смешения вод и уточнить представления геологов о глубинном строении нефтяного месторождения.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОИСХОЖДЕНИИ РАДИОАКТИВНОСТИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВЫХ ВОД

Гипотезы, объясняющие происхождение радиоактивности нефтяных пластовых вод, можно объединить в две принципиально различные группы. Одни связывают повышенную радиоактивность нефтяных пластовых вод не с особенностями нефтяного месторождения, а с существованием некоего радиоактивного субстрата, находящегося вблизи нефтяной залежи. Другие рассматривают появление радиоактивных пластовых вод в зависимости от условий формирования состава пластовых вод именно нефтяных месторождений. При этом допускалась возможность извлечения радия глубинными водами или из нефти, или из окружающих залеж горных пород в течение длительного процесса миграции нефти и воды, во время накопления нефти в естественной ловушке и последующей жизни месторождения. Не исключалась возможность даже особого "метеорного" происхождения нефтяных пластовых вод и привнесение при этом извне больших концентраций радия в них.

Такое разделение гипотез вполне соответствует историческому процессу развития наших знаний о геохимии радия и других радиоактивных элементов, в какой-либо степени связанной с нефтяными месторождениями.

Первая попытка теоретически обосновать повышенное содержание радия в нефтяных пластовых водах была сделана, как указывалось выше,

В. Саламоном (Salamon, 1926). По его мнению, источником радиоактивности могли быть радиоактивные руды или молодые граниты, залегающие вблизи нефтяной залежи. Из них в течение длительного времени глубинные воды вымывали радий, становились концентрированными и накапливались в структуре независимо от образования нефти. В пластовых водах Гейдельберга содержался не только радий, но и радиоактивный газ (эманация радия), который находился также в повышенных против равновесного количествах. Этот факт приводился как бесспорное доказательство правильности его гипотезы, поскольку газ в столь значительных количествах могли выделить только достаточно богатые радием природные соединения, т.е. радиоактивные руды. Присутствие радиоактивного газа свидетельствовало, по мнению Саламона, еще и о том, что источник радиоактивности должен был находиться ниже нефтеносных пластов, где температура окружающих горных пород выше. В соответствии с зависимостью, установленной Л. Коловрат-Червинским, было известно, что количество выделяемой минералами эманации радия увеличивается с повышением температуры, поэтому именно с глубины 1000 м и более В. Саламон считал появление радиоактивной пластовой воды вполне закономерным.

Последующее логическое развитие гипотезы В. Саламона сводилось к тому, что глубинные воды в течение длительного времени могли вымывать из гранитов не только радий, но и весь комплекс радиоактивных элементов, в частности уран, торий и продукты их распада, которые в рассеянном состоянии содержались в гранитах.

Открытие радиеносных нефтяных вод на Ухте (1926) и исследования залегания продуктивных пластов, к которым были приурочены радиеносные воды, поколебали казалось уже установившиеся представления о происхождении радиоактивности пластовых вод. Геологическое строение Ухтинского района было достаточно хорошо изучено и не было никаких оснований предслагать существование дотоле неизвестных концентрированных скоплений радиоактивных веществ. Ни сами нефтеносные пески, ни подстилающие горизонты и окружающие горные породы не содержали радий выше обычных средних значений. Кроме того, нефтяные продуктивные пласты распространялись на обширной площади. Все это говорило не о концентрации, а о широком рассеянии радиоактивных источников, оказавших влияние на состав радиеносных пластовых вод. Новые открытия радиоактивности в пластовых водах в Баку и Грозном окончательно опровергли эту гипотезу.

Вскоре В.И. Барановым (1927) в ухтинской воде были обнаружены торий-Х и радиоторий. Определение степени их равновесия позволило сделать новое важное предположение о вымывании радиоэлементов из обычных нерадиоактивных горных пород.

Он предположил, что на ход геохимического процесса, видимо, большое влияние оказывают свойства самой нефти, в частности ее абсорбционная способность к радиоэлементам, пути и скорости миграции нефти и сопутствующей воды.

Таким образом, В.И. Баранов связывал повышенную радиоактивность нефтяных пластовых вод с формированием и особенностями состава нефти, с процессом формирования собственно нефтяного месторождения.

Исследования радиоактивности буровых вод нефтяных районов Ухты, Грозного, проведенные Радиевым институтом, показали, что в буровых водах наблюдается новая и еще неизученная форма концентрации радия на земной поверхности. Это дало основание начать большую работу по изучению радиоактивности нефтяных пластовых вод на территории Советского Союза, подтвердившую первые предположения В.И. Баранова. Под влиянием новых фактических данных В. Саламон (Salamon, 1931) пересмотрел свои взгляды на уникальность радиоактивных вод Гейдельбергской скважины и согласился с выводами русских ученых о происхождении повышенной радиоактивности пластовых вод нефтяных месторождений.

Началось изучение связи радиоактивных элементов в пластовых водах с химическим составом нефти, зависящим прежде всего от ее происхождения. Согласно теории органического происхождения нефти материалом для образования нефти служили органические остатки древних морей и океанов. В морских илах было обнаружено больше радия, чем в морской воде или горных породах. Наметилаь как бы прямая связь между повышенной радиоактивностью морских илов, древних морских органических осадков, составом нефти и повышенным содержанием радия в пластовых водах нефтяных месторождений.

Было высказано предположение о том, что радий первоначально должен был концентрироваться в нефти в процессе ее образования из живых организмов (Никитин, Комлев, 1930). Затем он постепенно извлекался из нефти пластовой водой. В Радиевом институте проводились работы по определению радиоактивности нефти и пластовых вод одних и тех же месторождений и пластов. Но оказалось, что радий содержался только в пластовых водах, в нефти он обнаружен не был.

Было решено проверить содержание урана в нефти и водах. Если в органических веществах, из которых образовалась нефть, уран был действительно сконцентрирован, то либо уран, либо долго живущий ионий должны были перейти в процессе образования нефти в водную фазу (Никитин, Меркулова, 1933). Однако из сложности определения малых количеств урана необходимые данные не были получены.

В ходе систематических исследований на радий нефтяных пластовых вод возник еще один неясный вопрос. Не все пластовые воды одних и тех же нефтеносных районов были радиоактивными. Так, в Азербайджане среди многих генетически связанных между собой месторождений оказалось несколько (на о-ве Артема, в Бинагадах), в пластовых водах которых радий не был обнаружен. Такая же картина наблюдалась и в Майкопе. Исследования нефтяных вод некоторых скважин выявили причину исчезновения в них радия. Оказалось, что изливающиеся воды были сопутствующими, генетически не были связаны с нефтяными залежами.

Найти общие закономерности появления радия в нефтяных пластовых водах долгое время не удавалось. Предположение о возможности существования некоторого равновесия по отношению к радю (и может быть, к урану) между пластовыми водами и нефтью впервые высказали

В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин (1932). По их мнению, в общем виде равновесие



могло быть в некоторых случаях сдвинуто в сторону воды и тогда радий находился в нефти или в сторону нефти — тогда радий обнаруживался в больших количествах в пластовой воде. Механизм происхождения радиоактивности нефтяных пластовых вод представлялся им сложным, и установление простых связей между составом пластовых вод и составом нефти было чрезвычайно затруднено. Повышенная радиоактивность нефтяных пластовых вод становилась явлением все более и более загадочным. Ответы на возникающие в процессе исследований многочисленные вопросы можно было получить только после установления четких представлений о геохимии радия и урана (и, вероятно, других элементов) во всех природных водах.

В подходе к пониманию механизма обогащения радием нефтяных пластовых вод сыграла решающую роль "История природных вод" В.И. Вернадского (1960)¹. Большая часть нефтяных пластовых вод представляет собой соленые воды или рассолы, редко встречаются пресные или слабосоленые радиоактивные воды. Это дало основание В.И. Вернадскому считать, что радиеносные нефтяные пластовые воды представляют собой смесь ископаемых морских вод с обычными пластовыми. В ряде случаев морские и пластовые воды по химическому составу (по крайней мере по содержанию микроэлементов — йода, брома, марганца и других) могли бы считаться достаточно близкими между собой². Но, несмотря на это, В.И. Вернадский считал более близкими по химическому составу к пластовым водам не морские воды, а морские осадки — илы. Он полагал, что формирование состава нефтяных пластовых вод начиналось еще при образовании осадочных пород из морских илов. В.И. Вернадский обращал при этом внимание на различие в происхождении морской воды и морских осадков.

Поскольку повышенная радиоактивность нефтяных пластовых вод почти всегда встречается совместно с продуктивными нефтяными пластами, В.И. Вернадский не исключал возможности существования еще не установленной связи между ними. Это могло быть равновесие в системе нефть — пластовые воды или зависимость радиеносных пластовых вод от генезиса природных углеводородов — нефти.

Особое значение он придавал присутствию в нефтяных пластовых водах растворенных радиоактивных газов (радона, гелия, изотопов радия и мезотория), а также свободного кислорода. Образование последнего на больших глубинах, по его мнению, происходило во время какого-то (тоже еще неизвестного) мощного радиохимического процесса, протекавшего в области более глубоких вод, содержащих радий и мезоторий.

¹ Первый выпуск этой книги на русском языке вышел в 1932 г., отдельными выпусками она была опубликована в 1924 г. во Франции.

² На различие в составе нефтяных пластовых вод и современных морских вод впервые обратил внимание русский химик Л.Н. Потылицын в 1883 г.

вод окружающих горных пород, геохимических, радиохимических и других процессов.

Исследования содержания радиоактивных элементов в пластовых водах помогали восстановить некоторые геохимические процессы. Так, Б.А. Никитин и М.С. Меркулова (1933) показали, что в пластовых водах месторождения Бибь-Эйбат дочерний элемент радий отделен от своего прародителя урана. Известно, что это возможно только в двух случаях: если в сравнительно недавнее время радий попал в воды и еще не успел разложиться или уран также совсем недавно был удален из раствора, а радий как дочерний элемент пока еще сохранялся. В том и другом случае возраст пластовых вод должен быть очень небольшим. Полученные результаты как бы подтвердили гипотезу о "метеорном" происхождении пластовых вод (Голубятников, 1916). И хотя эта гипотеза в дальнейшем не обсуждалась, эта работа показала важность определения абсолютного возраста пластовых вод для установления хода геологических и геохимических процессов в земной коре.

По более поздним данным американских исследователей, концентрация радиоактивных элементов в пластовых водах и нефти зависит от возраста окружающих залежь горных пород, например, в нефти, относящейся к третичным отложениям, урана содержится больше, чем в нефти палеозойских отложений (Пирс и др., 1959). Но увеличение концентрации урана, по их мнению, могло происходить за счет геологической обстановки эпохи образования нефти, ее последующей миграции и формирования нефтяного месторождения. Однако характер зависимости концентрации радиоактивных элементов в нефтяных пластовых водах от возраста вмещающих горных пород и нефти до настоящего времени не совсем выяснен.

Новый этап в изучении происхождения радиоактивности нефтяных пластовых вод, начатый в первой половине 30-х годов, продолжался в одном направлении около 40 лет. Отказавшись от идей существования радиоактивного субстрата и извлечения радиоактивных элементов из нефти, исследователи основное внимание уделили особенностям геохимических и химических процессов взаимодействия глубинной воды и окружающих горных пород.

Еще в начале 30-х годов Л.В. Комлев (1931), анализируя возможные пути миграции радиеносных пластовых вод, пришел к выводу, что процесс выпадения радия в осадок должен происходить на больших глубинах, если же радий все-таки находится в пластовых водах, то источник обогащения должен иметь широкое распространение на пути следования вод.

Таким источником, по мнению Л.В. Комлева, могли быть обычные массивные и осадочные породы с содержанием радия в пределах от 10^{-11} до $10^{-9}\%$. "Существование пород, включающих в себе рассеянный радий, в тесном проникновении капиллярной и трещинной водой благоприятствующего физико-химического характера — само по себе достаточно для образования обогащенных радием вод" (Комлев, 1933). Процесс перехода радия в раствор должен быть аналогичен процессу увеличения общей минерализации пластовых вод.

Комплекс порода + капиллярная вода Л.В. Комлев предлагал рассматривать как сплошную капиллярную среду, в которой радий находится в рассеянном состоянии. Если при этом соблюдаются условия стабильности содержания радия в растворенном состоянии, то в радиеносных пластовых водах должны также присутствовать широко распространенные в горных породах элементы ториевого ряда. В первую очередь, должны быть замечены изотопы радия ториевого ряда — мезоторий и торий-Х, а соотношение радия с его изотопами даст указание не генетическую связь радиоактивных элементов с породами.

Вскоре было получено соответствующее экспериментальное подтверждение. В пластовых водах Южного Дагестана В.В. Чердынцевым (Комлев, Чердынцев, 1933) было отмечено в пробе определенное количество тория-Х, которое через некоторое время самопроизвольно увеличилось, что указывало на присутствие в воде мезотория. В этих же водах были обнаружены атомы радия, которые сравнительно недавно перешли из горных пород в раствор. Таким образом, было показано, что в водах Южного Дагестана содержание радиоактивных элементов и их изотопов не соответствует равновесному составу природных вод и рассолов с древними материнскими глубинными горными породами. Подобное несоответствие наблюдалось и в водах других месторождений, что могло служить доказательством правильности представлений Л.В. Комлева о механизме формирования состава радиоактивных нефтяных вод. По Л.В. Комлеву, повышенное содержание радия в пластовых водах могло явиться результатом непрерывно протекающего процесса перераспределения радия между горной породой и водой определенного химического состава, благодаря особенностям которого не могут происходить вторичные процессы, направленные в сторону извлечения радия из раствора. С увеличением глубины буровых скважин по мере вскрытия новых нефтеносных и других пластов иного минералогического состава с иным содержанием радия возможно появление пластовых вод с изменяющейся концентрацией в них радия.

Во второй половине 30-х годов расширились исследования связей химического состава горных пород и природных вод. К этому времени в работах Л.В. Комлева были показаны ведущая роль щелочноземельных элементов в образовании соленых и рассольных вод и особенности происходящих при этом геохимических процессов. В Радиовом институте развернулись экспедиционные и экспериментальные работы. Было проведено обследование природных вод на территории Советского Союза и установлено распространение хлор-кальциевых и хлор-натро-кальциевых природных вод. Распределение в них радиоэлементов и изотопов сыграло решающую роль в установлении механизма миграции радия в земной коре.

Экспериментальные работы, проведенные Л.В. Комлевым и Б.А. Никитиным в конце 30-х годов по выщелачиванию радия и его изотопов из осадочных пород различными растворами, убедительно подтвердили возможность их извлечения из обычных горных пород водами определенного химического состава.

Л.В. Комлевым была также определена роль некоторых элементов, влияющих на скорость этого геохимического процесса. Так, наличие в

радиеносных пластовых водах жесткого типа кальция, стронция и бария создает более благоприятные условия обогащения вод радием.

С 40-х годов усилия ученых были направлены на выяснение роли химического состава пластовых вод и отдельных его компонентов. В конце 40-х — начале 50-х годов И.Е. Старик показал решающую роль катионов в процессе выщелачивания пластовых вод (Старик, Щепотьева, 1956). По силе влияния на процесс выщелачивания катионы распределяются в следующем порядке (от более сильного):

$H - Ba - Sr - Ca - K - Na$.

Исследования И.Е. Старика о роли катионов в процессе выщелачивания природных вод и уточнение механизма формирования радиеносных пластовых вод хлоркальциевого типа подтвердили и значительно расширили гипотезу, высказанную ранее Л.В. Комлевым.

Более того, гипотеза о происхождении радия и его изотопов в нефтяных пластовых водах за счет взаимодействия вод определенного типа с горными породами дальнейшими исследованиями полностью подтвердилась и в настоящее время является общепринятой (Радиевый институт. . . , 1973).

В 50-х годах исследованиями Ф.А. Алексеева был подтвержден вывод Л.В. Комлева об определенной направленности процесса и значении щелочноземельных элементов. Было доказано, что присутствие в водах хлоридов щелочноземельных элементов создает условия для обогащения вод радием и устраняет возможность извлечения его из растворов (Алексеев и др., 1958).

Если принять, как указывали Л.В. Комлев и Ф.А. Алексеев, что уран в исходных водах содержался в ничтожно малых количествах (менее 1% от равновесного с радием) или полностью отсутствовал, то можно было бы доказать миграцию радия из горных пород в результате проникновения пластовых вод в капилляры горных пород. При этом вполне закономерным оказывалось бы и обогащение вод изотопами радия ториевого ряда, которые также содержались в горных породах.

С конца 50-х годов представления о радиеносности как исключительном свойстве нефтяных пластовых вод под влиянием новых данных вынуждены были измениться. Изучение распространения и происхождения радия в пластовых водах Русской платформы, проведенное Н.В. Тагеевой (1958), показало, что повышенная радиоактивность глубинных вод является общим свойством вод хлор-натро-кальциевого типа и не всегда связана с нефтяным месторождением. Накопление радия в пластовых водах оказалось явлением широко распространенным, связанным с обычными песчано-глинистыми породами. Причем радий накапливался в наибольших количествах в водах застойных, изолированных от общего ее круговорота. Этим могло объясняться присутствие радиоактивных пластовых вод в нефтяных залежах, которые, как правило, должны были долгое время оставаться закрытыми и изолированными.

В начале 60-х годов вновь было обращено внимание на возможную связь повышенной радиоактивности пластовых вод с нефтью. Однако мнения относительно интерпретации полученных данных разошлись.

Г.Х. Эфендиев предлагал учитывать влияние контакта пластовых вод с горными породами и с нефтяной залежью (Эфендиев и др., 1964). Ряд особенностей в распределении радиоактивных элементов и их изотопов в пластовых водах, по его мнению, можно было бы объяснить особенностями переходной зоны этих контактов.

Исследования нефтяных месторождений Западной Туркмении, проведенные Ф.А. Алексеевым, не подтверждали выводов Г.Х. Эфендиева. Накопление урана в природных водах Туркмении возрастало по мере их опреснения и в предконтурной и подошвенной частях нефтяной залежи (Алексеев, Готтих, Воробьева, 1968). Поскольку повышение содержания радия с приближением к водонефтяному контакту отмечалось только на нескольких месторождениях, то Ф.А. Алексеев считал, что оно не отражает генетическую связь с нефтью, а скорее является следствием изменения состава самих вод в зоне соприкосновения их с нефтяной залежью.

Как видно, представления о происхождении повышенной радиоактивности нефтяных пластовых вод за прошедшие 50 лет претерпели существенные изменения.

В настоящее время на основании работ В.И. Баранова, Л.В. Комлева, В.В. Чердынцева, И.Е. Старика, Н.В. Тагеевой, Ф.А. Алексеева, Г.Х. Эфендиева и многих других принято считать источником повышенного содержания радиоактивных элементов в нефтяных пластовых водах вмещающие горные породы.

Установлено, что на распределение радиоактивных элементов между горной породой и контактирующей пластовой водой оказывают влияние химический состав вод и нефти, а также индивидуальные особенности геологического строения и протекающих геохимических процессов.

ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВА ПЛАСТОВЫХ И ДРУГИХ ПРИРОДНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ОТКРЫТИЕМ ИХ РАДИОАКТИВНОСТИ

Состав нефтяных пластовых и других природных вод отражает влияние многих сложнейших процессов, протекающих в недрах Земли. Вода не только химически, но благодаря взаимодействию межмолекулярных сил и физически связана с минералами и горными породами. Она входит в состав всех природных земных тел и активно участвует в геологических и геохимических процессах (Вернадский, 1929).

Нефтяным пластовым водам принадлежит решающая роль в создании, жизни и даже гибели нефтяного месторождения. Их формирование начинается с момента отложения осадка. По мере накопления вышележащих слоев происходит механическое уплотнение осадков, выжимание из них избыточной воды в различных направлениях. Механическое уплотнение отлагающихся осадков происходит в условиях физико-химического взаимодействия воды с горной породой и тектонических движений земной коры. Зоны трещиноватости, разломы и другие нарушения меняют распределение интенсивности уплотнения пород и направление оттоков воды.

Нефтяные пластовые воды формируются в течение длительного времени, когда начальные погребенные воды, перемещаясь по разломам и тектоническим зонам дробления и смятия, в конце концов сосредоточиваются в структурах, содержащих нефть или благоприятных для скопления нефти. В системе горные породы—природные воды—нефтяные пластовые воды—нефтяная залежь на каждом этапе ее развития создается и существует определенный, присущий только данной природной обстановке комплекс растворенных в воде соединений. При переходе воды в другую природную обстановку (подразумеваются вмещающие горные породы, природные воды и нефть, с которыми контактируют нефтяные пластовые воды) состав ее изменяется, однако сохраняется ряд характерных особенностей предыдущего периода.

Нефтяные пластовые воды участвуют в геологических процессах всей системы горные породы—природные воды—нефтяные пластовые воды—нефтяная залежь. Следует напомнить, что на связь природных вод с геологическим строением земной коры в нефтеносных районах указывали многие известные геологи еще в прошлом веке. Так, Г.В. Абих обращал внимание на значение минеральных вод как показателя некоторых геологических процессов в районе Кавказа, а С.Н. Никитин (1866—1890 гг.) установил непосредственную зависимость подземных вод от геологического строения региона. Много внимания уделял происхождению и формированию подземных вод И.В. Мушкетов. В начале века А.Д. Стопневич (1923) провел длительные исследования пластовых вод в Ставрополье и определил геотермическую ступень, равную 10,5 м на 1°С. Он неоднократно обращался в Геологический комитет с предложениями проводить исследования природных вод, поскольку они связаны с "явлениями геологического порядка". А.Д. Стопневич был инициатором организации и первым заведующим специальным Отделом минеральных вод при КЕПСе в 1919 г.

В начале 20-х годов В.И. Вернадский систематизировал накопленные к тому времени материалы по химическому и газовому составу природных вод и установил роль в геохимических процессах отдельных компонентов природных растворов различного происхождения (Вернадский, 1960). Геохимическая история этих компонентов должна изучаться с учетом миграции природных вод и участия их в планетарных кругооборотах. В аспекте геологического времени все природные комплексы находятся в едином физико-химическом равновесии, хотя в отдельных районах они могут быть обособлены и даже разрознены. В.И. Вернадский различал три вида равновесия воды в природе. Первое равновесие (Э. Галлей, 1691—1693 гг.) предоставляет большой гидрологический кругооборот атмосферной, наземной и подземной вод континентов и морских бассейнов. Второе равновесие установлено А.Ф. Лебедевым (1918—1920 гг.) между поверхностными и пластовыми водами и подземными водяными парами. Третье представляет процесс перехода "донных и грязевых вод морей" в пластовые воды континентов. В первых двух вода ведет себя как растворитель (при высоких давлениях и температурах вода приобретает свойства сильной кислоты), в третьем основное значение имеет миграция компонентов растворов. Через несколько десятилетий А.Н. Семихатов ввел, а позднее А.А. Карцев развил понятие гидродинамического цикла,

которое предусматривает исторический подход при изучении движения подземных вод вообще (Семихатов, 1947; Карцев 1963). Со временем становилась все более очевидной огромная роль природных вод в жизни земной коры (Федосеев, 1967, 1975).

Что касается части этой проблемы — значения пластовых вод в процессе образования нефтяного месторождения или отдельной залежи, то первые попытки подойти к решению этого вопроса были отмечены еще в конце XIX в.; но четко сформулированы были только в начале XX в. И.А. Андрусов (1908) на примере образования месторождений нефти на Кавказе отметил тесную взаимосвязь ископаемых морских вод с нефтяными залежами. Он показал, как углеводороды, продвигаясь вместе с капиллярной водой, могут накапливаться в пористых песках закрытой структуры и постепенно создавать нефтяную залежь. В некоторых случаях пластовые воды могут перемещать залежь и даже разрушать ее. Исследуя пластовые воды, геолог-нефтяник В.П. Савченко (1952) отметил в ряде районов заметное смещение нефтяных и газовых залежей в направлении движения пластовых вод, уносящих углеводороды. Вместе с движущимися водами происходит не только миграция углеводородов (нефти и газа), но и перемещение различных рассеянных элементов. К таким "гидрогеническим" элементам относятся марганец, йод, бром, никель, хром, олово, сурьма, кобальт, литий, а также уран, торий, радий и многие другие. В настоящее время имеются многочисленные свидетельства о широком распространении процессов рудообразования в результате действия различных подземных вод, в частности нефтяных пластовых.

В конце 60-х годов в различных академических институтах, в том числе в Институте геологии и геофизики СО АН СССР, усиленно проводился анализ проб пластовых вод нейтронно-активационными методами. Дальнейшее изучение содержания микроэлементов в пластовых водах показало возможность выявления в природных водах некоторых индикаторов месторождений полезных ископаемых, в частности нефти и газа, а также элементов указателей путей формирования нефтегазоносных залежей (Бочкарев и др., 1973).

Современные ядерно-физические методы позволяют выявлять в пробах самые незначительные содержания многих элементов. Так, золото может быть выделено при содержании в пробе $4 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-8}$ г, серебро — $3 \cdot 10^{-5}$ г, сурьма и цезий — $6 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-7}$ и $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$ соответственно. Разработаны методы определения в пробах малых содержаний скандия, кобальта, брома, германия, мышьяка, железа, галлия, рубидия, брома, меди и других элементов.

Всеобщность явления радиоактивности и распространенность радиоактивных элементов и их изотопов в нефтяных водах и горных породах создали убедительную физическую базу нового ядерно-физического направления в разведке полезных ископаемых, основанного на измерении радиоактивных излучений горных пород. На основе изучения геохимии радиоактивных элементов нефтяных пластовых вод были разработаны первые методы нефтяной ядерной геофизики — радиоактивный каротаж нефтяных скважин.

**НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД
НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (1930—1940 гг.)**

В период первой пятилетки одной из важнейших предпосылок быстрой индустриализации СССР и перестройки сельского хозяйства на основе машинной техники было обеспечение народного хозяйства горючими и смазочными материалами. Нефть требовалась также для развивающихся новых отраслей промышленности: автомобиле- и авиастроения. Однако устаревшая техника бурения задерживала разведку и ввод новых площадей в эксплуатацию. Выявленные благоприятные для скопления нефти структуры в основном проверялись разведочным бурением. Для определения нефтеносных горизонтов необходимо было исследовать образцы горных пород, проходимых скважиной. Процесс бурения, и без того трудоемкий, еще более замедлялся вынужденными остановками для взятия проб и их подъема на поверхность. Эти образцы и их петрофизические и геологические описания были основанием для составления геологической документации скважин и месторождения в целом. Использовались еще и сведения, поступающие от буровых мастеров. В ежедневном рапорте, помимо технических данных о скорости проходки и количестве пробуренных метров, буровая бригада должна была указывать также твердость пройденных бурением пород и глубины нефтеносных пластов. При таком способе выделения продуктивных нефтеносных пластов и горизонтов задача резкого увеличения добычи нефти потребовала бы колоссальных объемов бурения и длительного времени.

Начались поиски принципиально новых физических (геофизических) методов разведки. Несколько позднее геофизические методы стали применяться при исследованиях нефтяных скважин, т.е. непосредственно для изучения разреза нефтяных месторождений и определения продуктивных пластов в скважинах.

Ускорение разведочных работ на нефть было задачей общегосударственной. В работу включились ученые различных специальностей, научно-исследовательские институты, был использован зарубежный опыт. Несмотря на имевшиеся в то время достижения в новой геофизической области, Советское правительство пригласило в 1929 г. французскую фирму "Шлюмберже" для оказания технической помощи в развертывании геофизических исследований на нефть. Первые опыты геофизических исследований нефтяных скважин — электрический каротаж — французская фирма провела в Баку и Грозном в 1929—1930 гг. Сначала определялось только электрическое сопротивление горных пород, вскоре фирма ввела измерения других параметров естественного электрического поля.

Электрический каротаж значительно ускорил проведение исследований в скважинах, но неоднозначность интерпретации полученных данных в первые годы была при каротаже даже несколько больше, чем при отборе керна, поскольку измерения проводились дистанционно, получаемые данные были косвенными и требовали глубоких и всесторонних знаний физики пласта, электротехники и даже особой интуиции. Надо сказать, что из-за сложности задачи теория естественного электрического поля была разработана только спустя почти 40 лет советским геофизиком Л.С. Альпиным. Получаемые при электрическом каротаже данные: кажущееся электрическое сопротивление горных пород КС и величина естественного электрического поля ПС не могут трактоваться однозначно, поскольку зависят от многочисленных процессов в пласте. Но они помогают определять принадлежность пластов к тем или иным литологическим разностям и на некоторых участках могут частично заменять отбор образцов, сокращая тем самым время бурения скважины. И хотя в процессе каротажа измеряются суммарные электрические величины, в каждой точке измерений исследовался настолько малый участок по стволу скважины, что пласт в точке измерений мог считаться однородным. Этот факт существенно облегчал интерпретацию данных как электрического, так впоследствии и радиоактивного каротажа.

Усовершенствование аппаратуры электрического каротажа и техники измерений давало возможность проводить измерения и запись параметров непрерывно по всему стволу скважины. Однако для того чтобы можно было полностью отказаться от отбора керна, заменив его геофизическими измерениями, т.е. перейти к так называемому бескерновому бурению, требовалось знание и других физических параметров пласта. Важным дополнительным, а может быть, и основным параметром могла оказаться радиоактивность горных пород, поскольку радиоактивные элементы и изотопы входят в разных сочетаниях в состав всех горных пород земной коры.

Мысль о возможности использования радиоактивных излучений пород для определения их свойств была не нова. Так, например, в начале 20-х годов Л.Н. Богоявленский впервые попытался создать на этой основе методы полевой разведки нефтяных месторождений. Однако в то время общий уровень физических исследований вещества и радиоактивных свойств минералов еще не мог обеспечить правильного понимания происходящих в земной коре сложных процессов. Не было достаточно четкого представления о взаимодействии радиоактивных элементов с горными породами, о связи радиоактивных элементов с нефтяной залежью и т.п. Поэтому эти попытки окончились неудачей.

В начале 30-х годов произошли серьезные изменения в ядерной физике, были открыты нейтроны, позитроны, искусственная радиоактивность, значительно усовершенствованы методы бомбардировки ядра и измерения излучений. Область использования радиоактивных излучений в науке и технике расширилась. Наметился поворот от изучения сущности процессов в сторону исследований излучений в физических средах. Для физиков важно было узнать, почему и как были рассеяны радиоактивные элементы в земной коре. На эти вопросы пришлось искать ответы совместно с гео-

логами, которых при этом интересовала также практическая сторона — возможность использования теоретических результатов для разведки полезных ископаемых.

Исследования радиоактивности горных пород разреза нефтяных скважин оказались еще более сложными, чем радиоактивности нефтяных пластовых вод. Особую трудность представляли поиски точных методов измерений ничтожно малых количеств радиоактивных и радиогенных элементов — радия, урана, изотопов свинца, гелия, тория, — рассеянных в горных породах. Пришлось пересмотреть существующие методы анализа, применяемые в различных областях науки.

Несмотря на, казалось бы, непреодолимые трудности измерений на больших глубинах в скважинах малых количеств элементов без отбора проб вещества, идея создания геофизического радиоактивного метода постоянно была в центре внимания геологов. Возможные пути создания производственного метода и прибора дистанционного определения состава горных пород, слагающих разрез нефтяных месторождений, по естественному радиоактивному излучению обсуждались в начале 30-х годов в Радиовом институте и Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте (ЦНИГРИ), в котором был организован радиометрический кабинет под руководством геолога А.П. Кирикова.

Постепенно была сформулирована практическая задача разработки и нашлись исполнители, способные понять задачу и найти пути к ее разрешению.

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕТОДОВ РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА

В начале 30-х годов создалась благоприятная ситуация для создания первых производственных методов, использующих радиоактивность для исследования геологического строения нефтяных скважин. К этому времени уже велись исследования радиоактивности нефтяных пластовых вод, которые явились естественным продолжением многолетнего изучения радиоактивности природных объектов вообще. Началось изучение радиоактивности и поднятых из нефтяных скважин образцов горных пород.

Исследования, проводимые вначале с целью изучения геохимии радиоактивных элементов и установления закономерностей их миграции с пластовыми водами, расширялись. Постепенно в их задачи вошло и установление последовательности некоторых геологических процессов формирования и жизни нефтяных месторождений.

Фундаментальные исследования радиоактивности пластовых вод и горных пород, полученных при бурении нефтяных скважин, проводились в Радиовом институте. Руководители исследований В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин уделяли внимание также возможностям практического приложения полученных физико-химических результатов к разведке полезных ископаемых. Высокий научный уровень, творческое и критическое обсуждение проблем и результатов, внимание ко всем замеченным

новым явлениям способствовали углублению исследований и расширению направлений их практического применения.

К началу 30-х годов в Радиевом институте был накоплен опыт использования радиоактивных излучений для разведки радиоактивных руд. Проведены исследования радиоактивности нефтяных пластовых вод для выявления новых промышленных источников добычи радия. Установлены основные закономерности геохимии радиоактивных элементов. В своих исследованиях институт применял новейшее физическое оборудование и приборы.

В институте впервые для регистрации космического излучения в начале 30-х годов С.Н. Верновым и Л.В. Мысовским были использованы разрядные счетчики вместо широко известных в то время ионизационных камер.

Помимо Радиевого института исследованиями радиоактивности горных пород, но только применительно к нуждам геологии занимались с конца 20-х годов в ЦНИГРИ. Исследовалась радиоактивность пород определенного литологического состава с целью определить связь между составом пород и их радиоактивностью. Было выяснено, что во многих случаях степень радиоактивности породы можно связать не столько с ее химико-петрографическими свойствами, сколько с условиями образования. Следовательно, радиоактивность некоторых пород, характерных для нефтяных месторождений, зависит от их местоположения в разрезе.

Оказалось также, что радиоактивность одного и того же геологического образования сравнительно мало менялась в пределах одного месторождения. Более того, оказалось, что в сравнительно узких пределах менялась радиоактивность глин (песков) соответствующих геологических формаций. Именно это помогло различать горные породы по их естественной радиоактивности. Но оставалось неясным влияние на радиоактивность горных пород радиоактивного газа — эманации радия, непрерывно создающегося радиоактивными элементами пород всей толщи земной коры. Поэтому в Радиевом институте и ЦНИГРИ в начале 30-х годов были поставлены дополнительные работы по исследованию эманации способной радиоактивных руд и горных пород непосредственно на месторождениях (Кириков, Богословская, Горшков, 1932), распространения радиоактивных эманаций в горных породах с различной пористостью и влажностью (Граммаков, Лятковская, 1935), а также была сделана попытка сравнить горные породы по скорости диффузии в них радиоактивных эманаций (Граммаков, 1936).

Как видно, научные исследования в области радиоактивности создали необходимые предпосылки для разработки практических методов исследования нефтяных месторождений. И хотя создание первого метода "геологического изучения" радиоактивности горных пород в разрезе нефтяных скважин было до некоторой степени побочным выходом фундаментальных исследований, это положило начало новому направлению практического приложения ядерной физики — ядерной геофизике.

РАЗРАБОТКА ПЕРВОГО МЕТОДА РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СССР

Задача разработки нового производственного метода исследования нефтяных скважин, поставленная перед геофизической группой ЦНИГРИ, заключалась в определении возможности использования радиоактивных измерений для корреляции разрезов отдельных скважин месторождения. Это означало, что по степени измеренной естественной радиоактивности горных пород можно было бы выделить опорные горизонты и проследить их распространение по всему месторождению. Этот метод, в случае удачи, мог бы стать основным геофизическим методом корреляции горизонтов нефтяных месторождений.

Одним из первых геологов, хорошо представлявшим целесообразность применения физических методов для геологических и разведочных работ, в первую очередь для разведки на нефть, был А.П. Кириков. Он принимал участие в исследованиях радиоактивности горных пород и пластовых вод в Радиовом институте, и с его помощью могли быть поставлены достаточно четко задачи практических приложений результатов проведенных исследований для разведки нефтяных месторождений (Ганшин, 1931). В дальнейшем А.П. Кириков привлек к работам по радиоактивности в качестве консультантов А.Г. Граммакова и П.Н. Тверского, а молодых физиков Г.В. Горшкова и Н.М. Лятковскую увлек возможностью разработки радиоактивных методов разведки полезных ископаемых, т.е. практическим применением их физических исследований.

В начале 30-х годов в состав группы по разработке новых методов исследования нефтяных скважин в ЦНИГРИ вошли Г.В. Горшков, А.Г. Граммаков, Л.И. Бочков, Н.М. Лятковская, А.И. Никонов, В.А. Шпак. Все они имели к тому времени опыт работы или с радиоактивными излучениями, или в области геофизической разведки нефтяных месторождений.

Наряду с попытками разработать теоретические модели процесса прохождение излучений в породах в естественном залегании группой были проведены экспериментальные исследования образцов пород, взятых непосредственно из нефтяных скважин. Г.В. Горшковым была выведена первая, весьма приближенная зависимость уменьшения энергии излучения с учетом поглощающих свойств среды (Кириков и др., 1934). По его данным, коэффициент поглощения зависел не только от свойств породы, но и от характера излучения. Он рассмотрел случай распространения гамма-излучения от точечного источника в однородной среде, аналогичный простейшему идеализированному случаю пересечения вертикальной скважиной однородного горизонтального пласта. На основании проведенных Г.В. Горшковым расчетов были ориентировочно определены необходимые размеры (по вертикали) ионизационной камеры и позднее — счетчика Гейгера—Мюллера, которые должны были обеспечить регистрацию радиоактивных излучений в пределах, обычных для реальных пород нефтяных скважин.

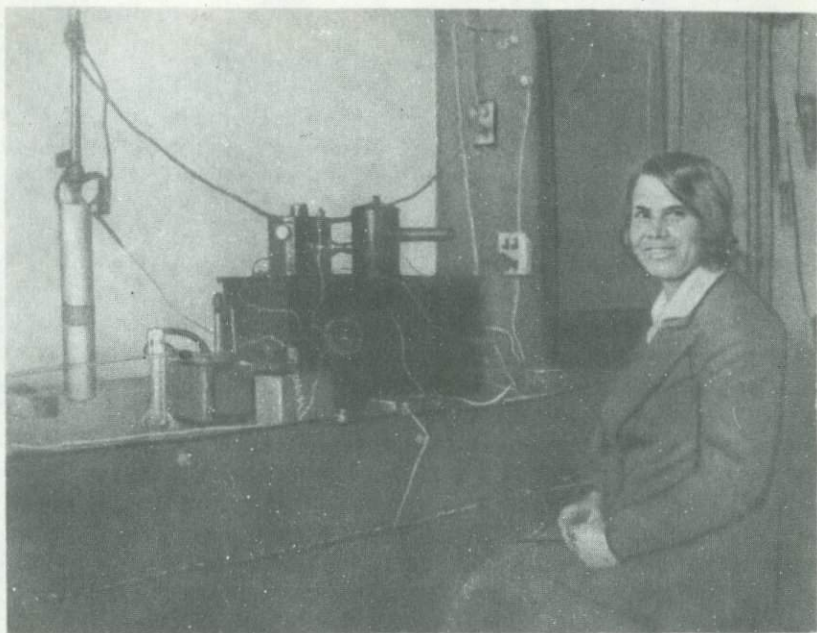
Разработка нового метода началась с создания специальной лабораторной установки — макета горных пород с нефтяной скважиной. Макет

представлял собой деревянный цилиндр диаметром 120 и длиной 300 см со съемными секционными перегородками для пород. Расположенная в центре труба диаметром 20 см имитировала буровую скважину. На установке проводились исследования радиоактивности горных пород, аналогичных встречающимся в нефтяных скважинах. Одновременно смонтированный второй экземпляр установки постепенно усовершенствовался с тем, чтобы в конце концов он мог быть пригодным для измерений непосредственно в скважинах.

На экспериментальных моделях (рис. 3) были исследованы возможности определения радиоактивности образцов отдельных пород, взятых из стенок нефтяных скважин; затем — сочетаний пород, таких, как гранит—сланец, гранит—песок, гранит—глина, известняк—песок и т.д. Определялось соответствие вычисленной и измеренной на модели радиоактивности. По результатам модельных работ могла быть оценена необходимая для создаваемого прибора точность и чувствительность. В итоге подтвердилась принципиальная возможность создания прибора для определения состава пород в их естественном залегании по измерению радиоактивности воздуха вблизи этих пород. Существенные трудности встретились при разработке конструкции прибора, пригодного для работы в скважинах. Кожух прибора должен быть весьма прочным, способным выдерживать давления в 1000—1200 атм и стойким к агрессивным средам — минерализованной пластовой воде и нефти. Кроме того, он должен быть малогабаритным, диаметр прибора не должен превышать 150 мм, чтобы достаточно свободно перемещаться по стволу скважины. В полезном объеме прибора необходимо было разместить довольно сложную измерительную схему, работоспособную при температурах порядка 60—120°C.

Первая попытка уменьшить размеры применяемых в то время ионизационных камер и приспособить их к работе в скважинах была предпринята в ЦНИГРИ в 1935 г.¹, но она оказалась безуспешной. Затем применили систему трубопроводов для транспортировки воздуха к ионизационной камере, расположенной на поверхности. Но и это не увенчалось успехом так же, как и у Р. Амбронна (Ambronn, 1926). Оказалось, что при взятии проб даже с небольшой глубины, например в 20 м, при транспортировке радиоактивность сильно изменяется. В связи с тем, что установки для отбора проб воздуха получались слишком громоздкими, измерения требовали много времени и заключения о составе пород на глубине часто могли быть ошибочными, пришлось отказаться от использования принципа отбора проб воздуха вблизи исследуемых пластов и определять их состав по измерениям радиоактивности проб в лабораторных условиях. В результате проведения первых модельных работ можно было сделать вывод о нецелесообразности применения радиоактивных методов для исследования скважин.

¹ Прибор с малогабаритной ионизационной камерой был впервые испытан в Ленинграде в скв. 80 на Фонтанке осенью 1935 г. Тогда же была записана первая кривая естественного гамма-излучения горных пород разреза скважины на глубину до 150 м.



Р и с. 3. Лабораторная установка для исследования радиоактивности горных пород разреза нефтяных скважин, 1935 г.

Интерес к работе мог совершенно погаснуть, если бы не предложение в 1934 г. Г.В. Горшкова использовать непосредственную регистрацию гамма-квантов с помощью счетчиков Гейгера-Мюллера, применявшихся в Радиовом институте в лабораторных условиях и С.Н. Верновым для измерения космического излучения. Модельные работы подтвердили целесообразность использования для регистрации естественного излучения в скважинах разрядных счетчиков, реагирующих непосредственно на излучение гамма-квантов горных пород. В отличие от ионизационной камеры, в счетчиках электроны, выбитые под воздействием гамма-квантов из его стенок, ускоряются в сильном электрическом поле прибора и в свою очередь вызывают ионизацию поля счетчиков. Таким образом, гамма-излучение пород непосредственно вызывает соответствующее импульсное излучение в устройстве счетчика, которое может быть передано на поверхность и подсчитано.

Для измерения и счета импульсов была разработана достаточно совершенная для того времени, но сложная и громоздкая схема. Следующим этапом совершенствования прибора и метода был отказ от передачи слабых импульсов счетчика на поверхность и разработка совмещенной в скважинном приборе счетной и измерительной схемы.

Следует отметить прогрессивность идеи Г.В. Горшкова. В течение последующих десятилетий счетчики применялись во всех приборах радиоактивного каротажа как в нашей стране, так и в США, где также, хотя и

несколько позднее, чем в СССР, стали применять радиоактивные методы исследования нефтяных месторождений.

К началу 1937 г. макет первого советского прибора радиоактивного каротажа был готов к промышленным испытаниям. Летом 1937 г. он был испытан в нескольких скважинах на нефтяных промыслах в Сызрани. Впервые прибор опускался в скв. 401, затем в скв. 405. Во второй скважине удалось по аномалиям гамма-излучения выделить известный опорный горизонт на глубинах 198—210 м. В скважинах 410 и 411 этот опорный горизонт по аномалиям радиоактивного излучения был прослежен на глубинах 185—240 м.

Измерения проводились в работающих скважинах, стенки которых были закреплены стальными трубами. Сам факт регистрации каких-либо параметров горных пород через стальные трубы с помощью даже несовершенного прибора имел огромное значение. Впервые была продемонстрирована возможность ядерно-физических исследований горных пород и выявления нефте- и водоносных горизонтов и пластов в скважинах, законченных бурением и даже уже эксплуатирующихся.

Итак, принципиальная возможность использования радиоактивных методов для исследования разреза нефтяных скважин была доказана. Но прибор следовало коренным образом усовершенствовать. Помимо того что были установлены принципиальные недостатки схемы прибора, было также выявлено, что при измерениях регистрируется только часть радиоактивного излучения горных пород, в связи с чем прибор должен был довольно долгое время находиться в одной точке, чтобы набрать количество импульсов, характерное для постоянного излучения данной породы. Подсчет времени показал, что для записи естественного гамма-излучения пород разреза скважины глубиной до 1000 м с интервалом в 1 м процесс измерений занял бы несколько суток. Поскольку столь долговременная остановка работающих скважин практически неприемлема, то на первом этапе радиоактивный каротаж применялся только для исследования неглубоких бурящихся на воду скважин и при поисках радиоактивных руд.

ПРОДОЛЖЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ПЕРВОГО СОВЕТСКОГО МЕТОДА ГАММА-КАРОТАЖА ИНОСТРАННЫМИ ФИРМАМИ

Доказательство принципиальной возможности изучения геологического строения разреза нефтяных скважин по регистрации естественного гамма-излучения на нефтяных промыслах СССР имело решающее значение в создании нового ядерно-физического направления в геофизике. Сообщения о проведенном в Сызрани гамма-каротаже нефтяных скважин были опубликованы в Журнале геофизики и Докладах Академии наук СССР с аннотациями на английском языке. Они сразу же были замечены и вызвали большой интерес со стороны специализированных геофизических и нефтяных компаний Франции и США.

Радиоактивными методами в применении к нефтяной промышленности в США начали заниматься с середины 30-х годов, однако произ-

водственные методы там еще не были созданы. Любопытна оценка перспектив применения радиоактивных методов по отношению к другим геофизическим методам, проведенная в то время научным отделом фирмы "Вел Сервейз Инкорпорейшн". С целью выявления самых новых и самых перспективных методов и направлений в геофизике, которые фирма могла бы начать развивать и немедленно внедрять в промышленность, был проведен анализ всех существовавших в середине 30-х годов геофизических методов. Наиболее перспективными были признаны радиоактивные методы, несмотря на то, что еще нельзя было перечислить практические результаты, которые можно получить на основании исследований естественной радиоактивности в бурящихся скважинах, поскольку "каротаж методом изучения уровня радиоактивности в горных породах является новым методом" (Howell, Frosch, 1939).

В США первый прибор радиоактивного каротажа был изготовлен в 1938 г. В нем использовалась специальная ионизационная камера, наполненная водородом под давлением. Запись производилась, как и в Сызрани, по точкам. Результаты испытаний оказались неудачными, как первые испытания советского прибора в 1935 г. в водяной скважине на Фонтанке. Учитывая перспективность метода, американская фирма привлекла специалистов по физике и радиоэлектронике. Был разработан специальный усилитель импульсов для ионизационной камеры, улучшена система записи и т.п.

Подхватив идею Г.В. Горшкова об использовании в приборах радиоактивного каротажа разрядных счетчиков, американская фирма стала усиленно работать в этом более перспективном направлении. В конце 1938 г. в США разработали новую схему с включением в измерительную часть двух параллельно работающих счетчиков Гейгера—Мюллера. Как указывали авторы, прибор мог осуществлять непрерывную регистрацию гамма-излучения горных пород по стволу скважины при движении со скоростью до 25 футов (8 м) в минуту. При больших скоростях возможны были пропуски в регистрации излучений соседних пластов.

В 1939 г. в США была изготовлена первая партия таких приборов и проведены в широком масштабе радиоактивные измерения на нефтяных промыслах Техаса. Начиная с 1940 г. гамма-каротаж стал обычным производственным методом в нефтяной промышленности США, применявшимся многими геофизическими фирмами.

В результате усиленной исследовательской и конструкторской работы с привлечением физиков и прибористов в последующие несколько лет американская техника радиоактивного каротажа оказалась на более высоком уровне, чем советская. После окончания Великой Отечественной войны нам удалось не только догнать, но и значительно опередить США в создании новых импульсных нейтронных методов ядерной геофизики.

К достижениям американских фирм следует отнести создание в 1940—1941 гг. передвижного комплекса для исследований нефтяных скважин на двух автомашинах. На одной из машин была смонтирована измерительная и регистрирующая аппаратура, а на другой вспомогательное устройство. Фирма ИЛАИ ("Инжиниринг Лабораторис Инкорпорейшн") скон-

струировала скважинный прибор диаметром 92 мм и длиной 3 м с питанием от батарей (Lane Wells, 1944). В нем же помещались усилительные схемы и модулирующие устройства. При радиоактивном каротаже использовалось стандартное оборудование, применяемое ранее при электрическом каротаже. В комплект входили: каротажный кабель на барабане, спусковые и подъемные механизмы, счетчики глубин, динамометры и другие контрольные приборы. Скважинный прибор и регистрирующая наземная аппаратура обеспечивали непрерывную регистрацию естественного гамма-излучения горных пород в разрезе нефтяных скважин глубиной порядка 1200—2000 м.

С помощью радиоактивных методов в США были проведены исследования работающих и заброшенных скважин. В некоторых из них были выявлены продуктивные горизонты, которые вводились в эксплуатацию и давали нефть. Радиоактивный каротаж был весьма полезен и при исследованиях бурящихся скважин. Дополнительные данные о естественной радиоактивности пород помогали более четко и уверенно выявлять глинистые покрывки и сами залежи.

Приборы и методы непрерывно совершенствовались, и широко использовались все новинки американской техники. Так, сцинтилляционные счетчики, разработанные в 40-х годах для физических экспериментов, в 50-х годах уже использовались в США в приборах радиоактивного каротажа в качестве индикаторов гамма-излучения. Несколько позднее они начали широко применяться и в советских приборах. Быстрое их внедрение в схемы приборов радиоактивного каротажа обязано способности кристаллов некоторых веществ (например, фосфора) к сцинтилляциям под действием гамма- и нейтронного излучения. Они давали возможность осуществить спектроскопию гамма-излучения при более простой схеме включения без каких-либо дополнительных устройств стабилизации. Другими важными преимуществами использования сцинтилляционных счетчиков при радиоактивном каротаже было увеличение скорости счета и, следовательно, уменьшение времени проведения измерений, а также получение непрерывной четкой записи по всему разрезу.

Раньше других сцинтилляционные счетчики в приборах радиоактивного каротажа начала применять фирма "Мак-Колоу" (Шаллер, 1956). В 1952—1954 гг. фирма провела с новыми счетчиками радиоактивный каротаж в основных нефтедобывающих районах и на разведочных площадях в США и Канаде. Диаграммы записи естественного гамма-излучения давали некоторое представление о мощности пересеченных скважиной пластов и их литологическом составе. По минимальным значениям излучения четко выделялись чистые известняки и песчаники, по максимальным — глины. Кроме того, можно было заметить увеличение глинистости известняков и песчаников по отношению к чистым породам, т.е. результаты гамма-каротажа, проведенного в процессе бурения, позволяли проводить корреляцию горизонтов и пластов на всем месторождении.

Проведение гамма-каротажа в действующих скважинах давало возможность более уверенно определять глубины для перфорации колон-

ны, а также места повреждения стенок скважины и скопления в нишах глинистого раствора.

Опыт применения на американских нефтяных месторождениях гамма-каротажа показал большую экономическую эффективность применения метода за счет уменьшения времени простоя бурящихся скважин и получения необходимой документации для восстановления добычи нефти в пропущенных горизонтах или недостаточно отработанных пластах старых, иногда заброшенных скважин. По результатам радиоактивного каротажа было введено в эксплуатацию большое количество нефтяных скважин¹.

По данным Комиссии по атомной энергии США получаемая нефтяной промышленностью США ежегодная экономия от применения гамма-каротажа составляла по стране в 1957—1958 гг. от 16 до 24 млн. долларов (Мотт, Эдингер, 1961). Комиссия отметила также, что внедрение методов радиоактивного каротажа представляет наиболее важную отрасль мирного использования ядерной энергии.

Создание первого метода гамма-каротажа в СССР и развитие его в США явились первым промышленным приложением достижений ядерной физики в нефтяной промышленности. Уже тогда была ясна и научная перспектива изучения радиоактивных излучений и их взаимодействия с горными породами, открывающая возможности дистанционного изучения вещества горных пород с земной поверхности.

¹ На первых порах это были в основном скважины, пробуренные еще до середины 20-х годов, когда не применялся электрический каротаж, а документация составлялась на основе исследования кернов. Кроме того, были введены в строй скважины и отдельные горизонты, в которых хотя и проводился электрокаротаж во время бурения, но по тем или иным причинам данные оказались неполными.

РАЗРАБОТКА ПЕРВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕТОДОВ
РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА (1940—1950 гг.)НАЧАЛО ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Впервые изучение возможностей применения методов нейтронной физики при исследовании нефтяных скважин было выполнено и опубликовано известным физиком Б.М. Понтекорво (Pontecorvo, 1941). Тот факт, что именно физик, весьма далекий по своим научным интересам от постановки подобных задач, оказался в состоянии разрешить важную практическую задачу изучения вещественного состава горных пород, не мог быть просто счастливой случайностью. Безусловно, решающее значение имел опыт научно-исследовательской работы в физической лаборатории под руководством Э. Ферми и тот подъем, который царил в физических лабораториях в 30-х годах. Исследованием превращений вещества под воздействием радиоактивных излучений в начале 30-х годов занимались многие физики во Франции, Германии, Италии, Англии и других странах. В 1932 г. Дж. Чадвику удалось открыть и доказать существование нейтрона, теоретически предсказанного Э. Резерфордом еще в 1919 г. Открытие нейтрона ознаменовало новую главу в развитии ядерной физики.

Следующим важным событием было открытие явления искусственной радиоактивности в 1934 г. супругами Ирен и Фредериком Жолио-Кюри. При бомбардировках альфа-частицами бора и магния они получили новые элементы: радио-азот и радио-кремний (Алиханян, Вайсберг, 1954). Стало ясно, что и другие частицы — "снаряды" — протоны, дейтроны и, по-видимому, нейтроны также могли вызывать радиоактивность.

В римской школе физиков Э. Ферми пришел к выводу, что нейтроны, "поскольку они не имеют заряда, должны особенно эффективно образовывать радиоактивные элементы" (Понтекорво, 1955). Со свойственной ему энергией Э. Ферми со своими учениками начал систематическую бомбардировку почти всех существующих элементов и неожиданно обнаружил вызванное нейтронами увеличение радиоактивности в водородосодержащих веществах, являющихся аномальными замедлителями нейтронов с большими энергиями.

Видимо, именно эти обстоятельства помогли Б. Понтекорво, переехавшему в США, начать облучение нейтронами горных пород с целью выявления водородосодержащих (нефтеносных и водоносных) пластов и горизонтов в нефтяных скважинах.

Интересно отметить, что под влиянием успехов нейтронной физики примерно в те же годы в Советском Союзе была высказана также физиком идея о возможности практического использования измерений взаимодействия нейтронов и горных пород, слагающих нефтяные месторождения. Речь идет о предложениях профессора Я.Г. Дорфмана, который в 1938—1940 гг. работал в Азербайджанском филиале Академии наук СССР. Научные организации старейшего центра нефтедобывающей промышленности Баку всегда были в той или иной степени связаны с решением задач бурения и добычи нефти. Поэтому Я.Г. Дорфмана интересовал вопрос о применении методов физики в геологии нефти. Он пришел к заключению о возможности выявления нефтеносных и водоносных пластов по содержанию в них водорода при облучении пород нейтронами и последующем измерении вызванной искусственной радиоактивности. Вместе с физиком Рыжановым, предложившим измерять еще и рассеяние породами нейтронов, они продумали механизм процесса взаимодействия горных пород с пучком нейтронов.

В конце 1939 г. предложения Я.Г. Дорфмана были обсуждены и одобрены в Физико-техническом институте в Ленинграде А.Ф. Иоффе и И.В. Курчатовым. Однако Я.Г. Дорфману не удалось получить необходимые ассигнования для постройки специальной модели искусственной скважины, создания измерительной системы и получения нейтронных источников.

В более благоприятном положении начинал работать Б.М. Понтекорво. В фирме "Вел Сервейз" уже проводились исследования естественной радиоактивности горных пород на моделях и в нефтяных скважинах, была разработана соответствующая аппаратура. После отработки аппаратуры гамма-каротажа и передачи ее для производственных коммерческих измерений в 1940 г. в фирме продолжались работы в том же направлении. Перед исследовательским отделом, в котором работали физики, была поставлена задача найти новые характеристики естественных источников радиоактивных излучений горных пород, которые также можно было бы записывать в нефтяных скважинах (Green, Fearon, 1943). При этом должно сохраняться преимущество радиоактивного каротажа, т.е. возможность проведения измерений в обсаженных скважинах. Кроме того, исследователи должны были найти физическую основу метода и аппаратуры, определить параметр, запись которого давала бы дополнительную информацию о проходимых скважиной горных породах, что могло быть использовано для более детальной корреляции горизонтов и пластов в разрезах нефтяных месторождений.

Разработанный прибор нейтронного каротажа по внешнему виду мало отличался от приборов гамма-каротажа. Внешне он представлял цилиндр с наружным диаметром 5,5 дюйма и длиной 7 футов.

Статья Б.М. Понтекорво о первом нейтронном каротаже нефтяных скважин (Pontecorvo, 1941) была краткой, описания прибора и измерений были весьма общими и не позволяли воссоздать прибор по описанию.

В прибор нейтронного каротажа входили: источник излучения (радий + бериллий) с защитным экраном, ионизационная камера и усили-

Рис. 4. Схема нейтронного каротажа по Б.М. Понтекорво, 1941 г.

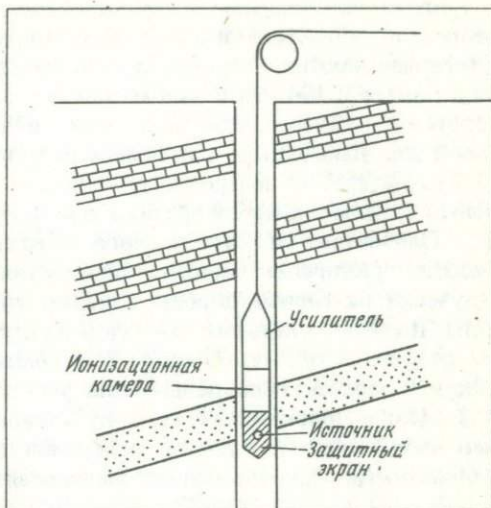
тель (рис. 4). Защитный экран должен был предохранять измерительную часть от прямого воздействия источника излучений. Избежать полностью попадания излучений в приборе не удалось и поэтому следовало эту часть излучения рассматривать в качестве постоянной составляющей прибора и учитывать при интерпретации полученных данных.

В статье приводились кривые нейтронного каротажа, записанные в районе Оклахома Сити при каротаже четырех нефтяных скважин, причем по одной из них для сравнения приведена еще и кривая сопротивлений.

Каротаж проводился с помощью стандартного скважинного оборудования фирмы "Лейн Уэллз". Записи нейтронного и электронного каротажа давали представление о хорошей корреляции горизонтов по этим кривым. Кривые нейтронного каротажа по сравнению с электрическим оказались более дифференцированными, что позволило различать многие пласты, которые до того времени не могли быть выявлены никакими другими методами.

Обобщая свои исследования, лабораторные и полевые испытания, Б.М. Понтекорво предполагал, что нейтронный каротаж нефтяных скважин должен давать возможность: 1) отличать известняки от песчаников, 2) легко выделять отдельные разности терригенных образований, 3) проводить на новой физической основе более точную корреляцию продуктивных горизонтов и использовать ее при определении содержания флюида в породах. Исходя из этого нейтронный каротаж рекомендовалось применять для исследований месторождений, продуктивные горизонты которых сложены известняками и доломитами, в месторождениях с соляными куполами, как, например, в Западном Техасе, а также во всех тех случаях, когда методы электрического каротажа оказываются безрезультатными.

Б.М. Понтекорво отмечал, что для увеличения скорости движения прибора при измерениях особенно важно увеличить интенсивность излучения источника (интенсивность примененного при испытаниях источника не была указана). Последующий опыт показал, что увеличение интенсивности источника излучений имеет свои ограничения, которые связаны с безопасностью обслуживающего персонала во время транспортировки и работы приборов.



Нейтронный каротаж в дальнейшем получил широкое применение. Теория и результаты измерений методом нейтронного каротажа заинтересовали многих физиков. Так, Э. Ферми при встрече с Б.М. Понтекорво в Чикаго в 1942 г., ознакомившись с работами в области нейтронного каротажа, высказал советы и многочисленные идеи, послужившие основой для дальнейшей длительной работы в этой области (Понтекорво, 1974). Интерес к нейтронному каротажу как к практическому приложению методов ядерной физики проявили И.В. Курчатов, Г.Н. Флеров, Л.С. Лейбензон. На базе первого метода нейтронного каротажа были созданы различные методы воздействия искусственного источника излучений на горные породы с целью определения их состава. Эти методы получили название методов нейтронного каротажа. Пятнадцать лет спустя, в 1955 г., физиком Г.Н. Флеровым была впервые высказана мысль о перспективности изучения реакции горных пород на излучения не только в пространстве, но и во времени. Были созданы малогабаритные импульсные генераторы нейтронов и серия методов, называемых импульсными нейтронными методами исследования горных пород.

ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОВ НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА В 1942–1947 гг.

В начале Великой Отечественной войны перед геофизическими организациями нашей страны была поставлена задача найти способы быстрого увеличения добычи нефти. Требовалось создать аппаратуру и методику, пригодную не только для разведки новых нефтяных месторождений, но и для исследования действующих скважин, так как экономически было выгоднее и, главное, быстрее выявлять новые нефтеносные горизонты и пласты в уже разрабатываемых месторождениях. Однако измерения каких-либо электрических величин, обычных при каротаже, проводить в действующих скважинах просто невозможно, так как стенки нефтяных скважин закрепляются стальными трубами, а пространство между обсадной трубой и горными породами заливается цементом. Внутри скважины заполнены нефтью и пластовой водой, являющимися агрессивными жидкостями.

Начались поиски новых физических методов, пригодных для исследований в обсаженных скважинах. В Центральной научно-исследовательской лаборатории геофизических методов разведки (ЦНИЛгеофизика) рассматривалась возможность определения песков, глин, известняков и других пород по различию теплопроводности горных пород и материала обсадных труб (предполагалось, что температура в точках измерений могла зависеть от температуры и, следовательно, состава окружающих горных пород). Была попытка создать метод, основанный на измерении сопротивления стеканию электрического тока обсадных труб в местах их соприкосновения с породами¹, и т.п.

¹ Предложенный Л.М. Альпиным способ измерения сопротивления стеканию тока впоследствии применялся для определения высоты подъема цемента в затрубном пространстве.

Но исследования 1942—1943 гг. не привели к созданию новых производственных методов исследования обсаженных скважин. В конце концов пришли к выводу о перспективности одного лишь направления — измерений радиоактивных излучений горных пород. Как было указано, метод и прибор были испытаны Г.В. Горшковым с сотрудниками еще в 1937 г. в Сызрани. Но прибор нуждался в существенной доработке, которая задерживалась из-за эвакуации Радиевого института из осажденного Ленинграда. Поэтому в план научно-исследовательских работ ЦНИЛгеофизики в начале 1942 г. была включена разработка метода нейтронного каротажа. Руководил темой известный геофизик профессор А.И. Заборовский, который должен был прежде всего выбрать модель взаимодействия нейтронов с горными породами и способ регистрации. Из многообразия возможных вариантов он рассмотрел только два, по его мнению, самых существенных (Заборовский, 1942). В первом варианте процесс реакции горных пород на нейтронное излучение представлялся так: нейтроны из источника, попадая в окружающую среду, претерпевают некоторое рассеяние и затем проникают в измерительную ионизационную камеру. Внутренние стенки камеры должны быть покрыты слоем парафина, из которого нейтроны выбивают протоны, которые ионизируют газ в камере и тем самым вызывают ионизационный ток в измерительной цепи. При этом интенсивность тока изменяется в зависимости от интенсивности пучка нейтронов, прошедших через горные породы и попавших на парафиновое покрытие ионизационной камеры. Интенсивность тока в измерительной цепи, таким образом, должна в какой-то степени отражать характер и свойства пород, рассеивающих нейтронное излучение источника.

Во втором варианте рассматривалась другая модель взаимодействия пород с излучением источника. Нейтронный поток источника не только рассеивается горными породами, но и замедляется в результате соударений нейтронов с ядрами элементов окружающих пород. Замедленные нейтроны захватываются ядрами атомов пород и в процессе захвата возникает гамма-излучение, проникающее в ионизационную камеру и вызывающее ионизационный ток в камере и измерительной цепи.

К концу 1942 г. А.И. Заборовский получил экспериментальное подтверждение связи образования большого количества медленных нейтронов при облучении пород и веществ, богатых атомами водорода (или вообще с малым порядковым номером). Следовательно, насыщенные водой или нефтью пласты должны создавать при нейтронном облучении интенсивные ионизационные токи в измерительной схеме прибора нейтронного каротажа. Однако для создания промышленного метода этого оказалось недостаточно, тем более что при испытаниях прибора выявилось много противоречивых данных. В макете прибора, разработанного А.И. Заборовским, внутренние стенки ионизационной камеры были покрыты парафином для ослабления эффекта прямого попадания нейтронного потока. При его испытаниях оказалось, что даже при облучении одного и того же образца неожиданно получались резкие колебания тока из-за незначительных изменений толщины парафинового слоя или расстояния между источником и индикатором, а также других кон-

структивных размеров отдельных деталей. Поэтому необходимо было провести детальные и глубокие исследования процесса взаимодействия нейтронного излучения с горными породами, а затем приступить к улучшению схемы и конструкции прибора.

По договору с геофизиками в Радиовом институте, начавшем к тому времени работу после эвакуации в Казани, исследования по нейтронному каротажу проводили Г.В. Горшков и Н.М. Лятковская — создатели метода гамма-каротажа нефтяных месторождений. Они должны были выбрать и представить модель процесса взаимодействия нейтронов с веществом горных пород. Для начала они избрали упрощенную схему и выделили два наиболее возможных случая (Горшков, 1944).

В первом случае рассматривалось использование тепловых нейтронов, рассеянных водой и окружающими породами. При этом количество попавших в прибор тепловых нейтронов должно зависеть от пористости, химического состава и влажности окружающих источник (и прибор) горных пород. Во втором — предполагалось учитывать гамма-излучение, возникающее в окружающей среде под действием нейтронов.

В подтверждение выбора приводились теоретические и экспериментальные работы Э. Ферми. Имелось в виду его замечание о замедлении попадающих в водородосодержащую среду нейтронов из-за столкновения их с ядрами водорода. Согласно Э. Ферми, процесс столкновения будет происходить до тех пор, пока нейтроны не потеряют избыток своей скорости по сравнению со скоростью теплового движения атомов, после чего они будут захвачены ядрами элементов (Ферми, 1934).

Г.В. Горшков представлял себе этот процесс в реальных условиях скважины несколько иначе и предполагал измерять при нейтронном каротаже влияние породы на поле тепловых нейтронов. Для измерения же быстрых нейтронов потребуется весьма сложная аппаратура. Г.В. Горшков и Н.М. Лятковская провели соответствующие расчеты и сконструировали специальную измерительную установку. Источник был помещен в свинцовую оболочку, окруженную водой. Было разработано несколько видов ионизационных камер с разными поглощающими веществами. В двух из них для поглощения нейтронов стенки камеры были выложены слоями твердого бора, в третьем — поглощающей средой был наполнявший ее газ BF_3 . Источником гамма- и нейтронного излучения служили радиоторий (образец весом в 138 г) и смешанный источник — радиоторий + бериллий (138 г).

Конструкция кожуха прибора нейтронного каротажа не отличалась от прибора гамма-каротажа, испытанного Г.В. Горшковым и Н.М. Лятковской в 1937 г. на нефтяном месторождении в Сызрани. Прибор нейтронного каротажа представлял собой стальной цилиндр диаметром 106 мм, длиной 320 см, весом 125 кг. В прибор входили нейтронный источник излучений со свинцовым экраном, индикатор медленных нейтронов, ионизационная камера, часть усилителя постоянного тока, источник питания (сухие элементы). Измерительная электрическая схема была ранее разработана А.И. Заборовским.

Проведенные испытания нового варианта прибора оказались неутешительными. Водородосодержащие породы никак себя не проявляли. Ре-

зультаты измерений сильно отличались от предварительных расчетных данных: наблюдаемый эффект взаимодействия нейтронов при измерениях камерами с твердым бором оказался в 50 и в 8 раз, а камерами с газовым наполнителем в 8 раз меньше вычисленного. Пришлось снова и снова проводить исследования на моделях. Обнадеживающие результаты получились при опытах на моделях с сухим и влажным песком.

В Радиовом институте в 1944 г. было проведено обсуждение результатов работы Г.В. Горшкова и Н.М. Лятковской. В нем приняли участие физики А.Н. Мушин, И.И. Гуревич, В.Н. Рукавишников, К.А. Петржак, М.Г. Мещеряков, Г.Р. Рик, А.В. Шуф и др. Поскольку физическая основа проведенных исследований представлялась достаточно обоснованной, совещание в Радиовом институте одобрило предложенную Г.В. Горшковым методику регистрации тепловых нейтронов при проведении нейтронного каротажа нефтяных скважин.

В 1945–1946 гг. разработка конструкции прибора, основанного на регистрации тепловых нейтронов, проводилась в Институте прикладной геофизики¹. Руководила работами геофизик Л.Л. Барыш-Тыщенко (1946), но ее вариант прибора также не выдержал испытаний.

ОБЪЕДИНЕНИЕ НАУЧНЫХ УСИЛИЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОСТИЖЕНИЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Работы по нейтронному каротажу, проводившиеся в Советском Союзе с 1942 по 1947 г., не привели к созданию приборов для его промышленного применения на нефтяных месторождениях. Из-за многочисленных принципиальных трудностей, возникавших при разработке прибора, метод использования воздействия нейтронного потока на нефтяной пласт и определения пород по их реакции на излучение уже не казался перспективным. В 1946 г. перестали заниматься темой нейтронного каротажа в Радиовом институте. В Институте прикладной геофизики (НИИПГ) в 1947 г. исследования по нейтронному каротажу также не проводились, хотя тема все еще оставалась в плане работ института (Печерников, 1948 а,б).

На этом, возможно, и окончились бы в то время попытки разработки методов нейтронного каротажа в нашей стране. Но случилось иначе. Американские фирмы в то время весьма интенсивно проводили геофизические исследования нефтяных скважин в Венесуэле. Методами радиоактивного каротажа были выявлены в разрезах эксплуатирующихся скважин новые продуктивные горизонты. Доктор технических наук профессор Ф.А. Требин, возглавлявший с 1946 г. Техническое управление Министерства нефтяной промышленности СССР, заинтересовался этими методами и убедился в их экономической эффективности и целесообразности для исследования старых, уже иногда заброшенных скважин. Он пос-

¹ ЦНИЛгеофизики в 1944 г. была реорганизована в Институт прикладной геофизики Министерства нефтяной промышленности СССР.

тарался привлечь внимание советских нефтяников к радиоактивным методам каротажа. Его лекции и доклады выслушивались с большим вниманием, поскольку любая возможность получения дополнительной нефти из старых скважин имела большое значение в период восстановления промышленности.

Интерес к разработке нейтронного каротажа заметно усилился. Особенно заинтересовался возможностью исследования нефтяных и газовых скважин новыми ядерно-физическими методами профессор кафедры подземной гидравлики Московского нефтяного института им. И.М. Губкина Б.Б. Лапук. Поверив в перспективы использования ядерно-физических методов, он, не будучи физиком, старался уяснить возможные аспекты их применения, связанные со спецификой нефти. Он был "одержим" возможностью промышленного применения ядерной физики в нефтедобыче, и с полным правом можно сказать, что он сыграл значительную роль в создании нового научного направления в промысловой геофизике. Он смог увлечь и академика Л.С. Лейбензона.

В сентябре 1946 г. Л.С. Лейбензон и Б.Б. Лапук обратились к руководству Министерства нефтяной промышленности с письмом, в котором обосновали необходимость и целесообразность срочного развития научно-исследовательских работ в области использования достижений ядерной физики в нефтедобывающей промышленности. Они указали на научное значение применения ядерной физики при добыче нефти и разведке нефтяных месторождений. Радиоактивные свойства горных пород вообще и особые "нейтронные" свойства водородосодержащих флюидов — замедлителей быстрых нейтронов — открыли, по их мнению, пути использования достижений ядерной физики в нефтяной промышленности как в производственной практике, так и для научных исследований.

Промышленное применение нейтронного каротажа должно было дать возможность определять физические параметры пластов нефтяных месторождений, необходимые для проектирования их рациональной разработки. Кроме того, нейтронный каротаж мог быть также полезен в процессе эксплуатации для наблюдения за процессом нефтеотдачи и продвижения контуров водоносности и нефтеносности.

В области научных исследований технологии добычи нефти и газа, подчеркивали они, ядерные методы открывают широкие возможности в решении проблем сегрегации жидкостей и газов в пластах в условиях режимов растворенного газа, а также вопросов изучения фазовой проницаемости и динамики связанной воды в горных породах и нефтеносных пластах. Во время бурения скважин и при разведке нефтяных и газовых месторождений по данным нейтронного каротажа будет возможно уточнять геологический разрез скважин, определять фазовые проницаемости, мощность, насыщенность и пористость пластов и т.п.

Как видно, Л.С. Лейбензон и Б.Б. Лапук обращали внимание на более широкое научное значение радиоактивных, в том числе нейтронных методов исследования нефтяных месторождений, чем проведение только каротажа скважин. Этим новая научная постановка задачи нейтронного каротажа существенно отличалась от постановки исследований американских

фирм, владеющих методом и аппаратурой нейтронного и гамма-каротажа нефтяных скважин.

В Министерстве нефтяной промышленности одобрили предложения Л.С. Лейбензона и Б.Б. Лапука. Осенью того же 1946 г. Б.Б. Лапук добился включения темы "Исследование нефтенасыщенности нейтронными методами" в план Всесоюзного научно-исследовательского нефтяного института (ВНИИнефть). Работы по теме стал проводить кандидат технических наук Р.М. Раскин, а научное руководство осуществлял на общественных началах Б.Б. Лапук.

В апреле 1947 г. по приказу двух министерств — нефтяной промышленности и высшего образования было решено организовать при Московском нефтяном институте Специальную лабораторию по использованию достижений ядерной физики в нефтедобывающей промышленности и Ученый совет по этой проблеме, на который были возложены обязанности постановки и утверждения тем и заданий, контроль за выполнением планов и оценка результатов проведенных исследований. Это была новая форма научной работы.

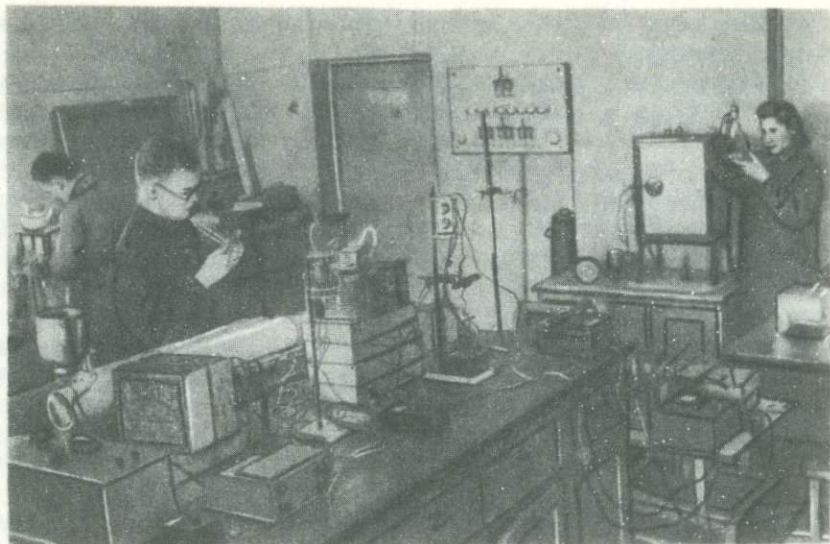
В состав Ученого совета, возглавляемого академиком Л.С. Лейбензоном, входили профессор химии нефтяник А.В. Топчиев¹, профессор кафедры подземной гидравлики Б.Б. Лапук, научный сотрудник Института атомной энергии кандидат физико-математических наук (впоследствии академик) Г.Н. Флеров, директор ВНИИнефть Д.Г. Паронджанов.

Научными консультантами были: по геофизическим методам разведки — кандидат геолого-минералогических наук С.С. Итенберг и позднее известные геофизики профессор С.Г. Комаров и профессор В.Н. Дахнов, по конструированию приборов и аппаратуры — кандидат технических наук Р.М. Раскин, по ядерной физике — Г.Н. Флеров.

Следует особо отметить ведущую роль Г.Н. Флерова в развитии ядерной геофизики в Советском Союзе. Со времени первых исследований в Спецлаборатории и по настоящее время с его помощью и под его научным руководством проводятся новые ядерно-физические исследования и разрабатываются новые методы разведки и контроля за разработкой полезных ископаемых. В Академии наук СССР он организовал и возглавил Научный совет по приложению методов ядерной физики в смежных областях, который может считаться высшим научным авторитетом в области ядерной геофизики в нашей стране.

Что же касается разработки метода и приборов нейтронного каротажа в те годы, то прежде чем приступить к проектированию аппаратуры, требовалось получить ответы на следующие вопросы: 1) какой метод регистрации радиоактивных излучений — нейтронный или гамма — более эффективен для выделения водородосодержащих пород; 2) каково должно быть допустимое соотношение между измеряемым эффектом облучения горных пород и общим фоном их естественной радиоактивности; 3) какими должны быть мощность источника излучения,

¹ Александр Васильевич Топчиев (1907–1962 гг.) был избран действительным членом Академии наук СССР в 1949 г.



Р и с. 5. Спецлаборатория Московского нефтяного института, 1947 г.

размеры фильтра, расстояние между индикатором и источником излучений и другие параметры прибора. Проведенный в Спецлаборатории анализ опубликованных данных показал, что в известных американских статьях нет ответов на подобные необходимые перед началом проектирования вопросы. А в предыдущих работах советских ученых, к сожалению, освещался только какой-либо один аспект сложного процесса взаимодействия нейтронов с горными породами.

Было ясно, что без достаточно доработанной теоретически и экспериментально физической основы процесса взаимодействия нейтронов с горными породами невозможно создать метод и работоспособный прибор нейтронного каротажа нефтяных скважин.

В план работы Спецлаборатории были включены сразу две темы: "Нейтронный метод определения нефтенасыщенности" и "Нейтронный каротаж скважин". Ход экспериментальных работ систематически обсуждался на Ученом совете лаборатории. Первый отчет был заслушан уже через два месяца — в июне, затем в ноябре и декабре того же года.

Остановимся несколько подробнее на результатах первых исследований, проводившихся в Спецлаборатории под руководством физика Л.С. Полака (рис. 5). Благодаря правильной постановке эксперимента и выбору направления расчетов вскоре им были получены первые самые общие данные, необходимые для расчета конструктивных параметров прибора. Он вычислил также зависимости интенсивности излучений от водородонасыщенности (или пористости) и химического состава горных пород. Л.С. Полак провел испытания образцов пород различной водонасыщенности. Оказалось, что содержание только 10% воды в поровом пространстве могло почти в четыре раза увеличить замедление

нейтронов по сравнению с сухими породами. Он экспериментально и теоретически определил влияние на величину пробега нейтронов некоторых поглощающих элементов, таких, как хлор, марганец, бор, железо, при диффузии тепловых нейтронов в породах. Было выявлено, что даже небольшие примеси поглощающих элементов в породах значительно сокращают расстояние возможного проникновения тепловых нейтронов в горные породы. Для реальных горных пород им были установлены длина замедления нейтронов (7–20 см) и путь диффузии нейтронов (2–5 см).

Тогда же Л.С. Полак начал вычисления зависимости распределения тепловых нейтронов от интенсивности гамма-излучения для пород различной пористости и провел экспериментальные измерения. Заметить какую-либо определенную закономерность между указанными параметрами долгое время не удавалось. Она существовала только при определенных условиях измерений, когда соблюдались оптимальные расстояния между источником излучений и индикатором. Оказалось, что при изменении пористости образца на 10% (в интервале пористости от 10 до 20%) показания индикатора, помещенного на расстоянии 80 см от источника излучений, меняются в 1,5–2 раза. Это могло послужить достаточно хорошей основой для количественного определения пористости по полученным данным. Пористость — один из наиболее важных параметров пласта, входящих в основные расчеты при проектировании разработки нефтяного месторождения, уточнении запасов нефти и установлении режимов работы той или иной скважины и пласта в целом.

Л.С. Полак на простой экспериментальной установке провел измерения для случая идеального пласта и реальной породы, сравнил полученные результаты с теоретическими расчетами. Первая экспериментальная установка, разработанная под руководством и при участии Л.С. Полака, предназначалась также для определения нефтенасыщенности образцов горных пород по измерению наведенной активности в детекторе (рис. 6). Насыщенный водой или нефтью песок облучался пучком быстрых нейтронов от радио-бериллиевого источника излучений. В породе нейтроны в большей или меньшей степени замедлялись в зависимости от содержания воды, нефти или других водородосодержащих флюидов и после прохождения всей толщи образца фиксировались специальной детекторной пластинкой, приложенной к образцу с противоположной стороны.

На простейшей установке были получены первые экспериментальные зависимости интенсивности потока вторичных гамма-квантов пород от их пористости и записан фон естественной радиоактивности образца. Радиоактивность детекторной пластинки измерялась счетчиками Гейгера—Мюллера, включенными в измерительную схему установки. Для измерения радиоактивности бета-излучения было предусмотрено использование бета-спектрографа. По измеренной интенсивности излучения перед образцом и за ним можно было приблизительно судить о количестве замедляющих элементов (водорода, хлора и других), входящих в состав исследуемого песка.

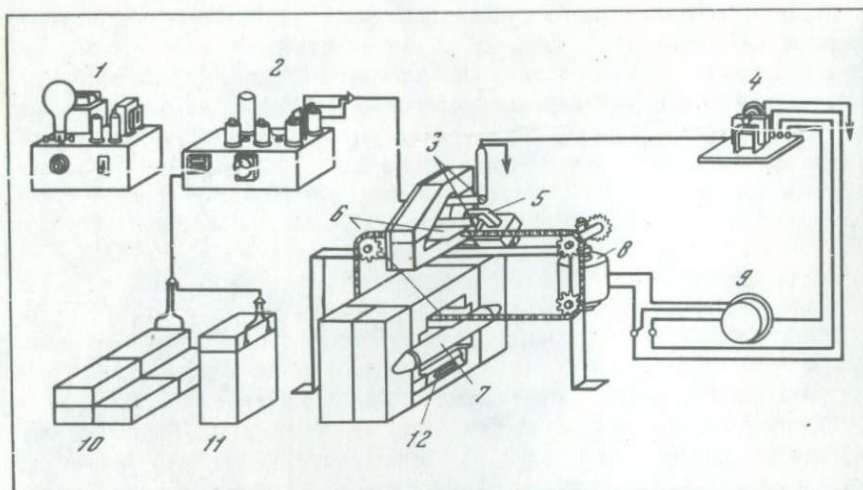


Рис. 6. Схема установки Спецлаборатории для определения нефтедонасыщенности нефтяных пластов

1 - выпрямитель бета-спектрографа; 2 - усилитель с нумератором для счета совпадений; 3 - счетчики Гейгера-Мюллера; 4 - программный включатель счетчиков и электродвигателя; 5 - магнит бета-спектрографа; 6 - детекторная пластинка; 7 - керн; 8 - электродвигатель; 9 - реле двигателя; 10 - батареи питания; 11 - аккумуляторы; 12 - источник нейтронов

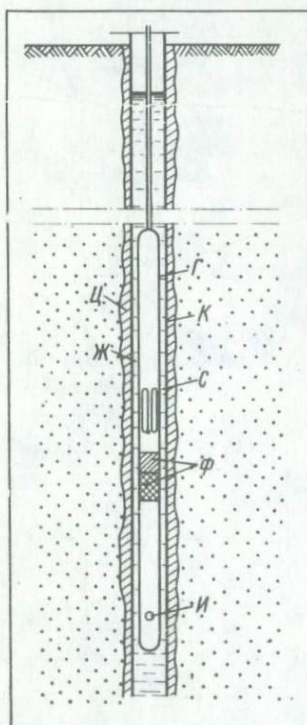


Рис. 7. Схема нейтронного каротажа по Л.С. Полаку, 1948 г.

И - источник быстрых нейтронов; Ф - фильтр; С - счетчики импульсов; Г - стенка прибора; Ж - жидкость, заполняющая скважину; К - стальная колонна, закрепляющая стенки скважины; Ц - цементное кольцо - затрубное пространство, заполненное цементом

В том же 1947 г. была построена другая экспериментальная установка, в которой интенсивность нейтронов, прошедших от источника через образец к индикатору, измерялась непосредственно ионизационной камерой или пропорциональным счетчиком.

Для расчета мощности источника излучений в лаборатории была получена рабочая формула.

Эти первые в СССР специализированные нефтяные экспериментальные установки, созданные в 1947 г., дали основания для принципиального решения вопроса о целесообразности дальнейшей работы в этом направлении.

Ученый совет по проблеме, подводя итоги первых экспериментальных исследований за 1947 г., отметил (Лапук и др., 1947а, б): эффект замедления нейтронов в нефтеводонасыщенном песке измерим; по полученным данным видна отчетливая зависимость между водородонасыщенностью (нефтью или водой) порового пространства образца и интенсивностью регистрируемых нейтронов; в экспериментальной установке применена новая схема, отличная от американской, с помощью которой принципиально возможно производить "мгновенное" определение нефтеводонасыщенности образцов горных пород. Но для применения на практике необходимо было изготовить либо более чувствительную камеру, либо применять более мощный источник нейтронов.

В результате первых серьезных физических исследований стал несколько более понятным, конечно в самом общем виде, процесс взаимодействия нейтронов с горными породами (рис. 7). Излучаемые источником *И* (радий + бериллий) быстрые нейтроны проникают в горную породу через гильзу — стенку прибора *Г*, стальную обсадную колонну *К* и цементное заполнение затрубного пространства *Ц*: Замедляясь в ближней зоне, нейтроны будут продолжать замедляться и в горной породе за счет столкновений их с ядрами элементов, входящих в состав пород. Хаотическое движение замедленных нейтронов в горных породах происходит до тех пор, пока в результате столкновений они не будут захвачены ядрами элементов пород. Захват медленных нейтронов сопровождается испусканием гамма-квантов. Вероятность захвата быстрых нейтронов до их замедления чрезвычайно мала. Индикатор *С* может регистрировать гамма-излучение горных пород, испускаемое в момент захвата медленных нейтронов. На первом этапе исследований рассматривалась возможность регистрации только двух видов излучений: нейтронов, поступивших непосредственно от источника, т.е. тех, которые не были поглощены окружающей средой и фильтром прибора, а также вторичного гамма-излучения, возникшего в результате захвата медленных нейтронов ядрами элементов, входящих в состав горных пород. В том и другом случае интенсивность приходящего к индикатору излучения при заранее выбранном расстоянии от источника до индикатора зависит от мощности источника (она известна) и свойств горных пород, в частности водородосодержания, которое и требуется определить.

В зависимости от типа индикатора, чувствительного либо к нейтронам (борная камера, счетчик и т.п.), либо к гамма-излучению (разрядный счетчик), возможны два варианта нейтронных методов исследования нефтяных скважин. Начиная с конца 40-х годов было принято называть методы измерения, основанные на регистрации тепловых нейтронов, нейтронным каротажем (НК), а методы измерения гамма-квантов — нейтронным гамма-каротажем (НГК). Принципиальные различия между

методами НК и НГК стали очевидны сразу же после предварительных исследований на экспериментальной установке в Спецлаборатории Московского нефтяного института. Метод НК давал возможность выявлять зависимость интенсивности излучения от содержания в горных породах хлора, натрия, бора и других поглощающих нейтроны элементов. При исследованиях в нефтяных скважинах, обычно заполненных жидкостью (водой или нефтью), на результаты измерений НК должно оказывать более сильное влияние водородосодержание скважины, а не горной породы.

На гамма-излучения при НГК наибольшее влияние должно оказывать водородосодержание порового пространства горных пород. Конечно, при этом сказываются и некоторые свойства пород, геометрические и технические данные конструкции измерительного прибора и индикатора, величина источника излучений, размеры и качество фильтров и т.п.

Исследования методами НК и НГК дают представление об общем характере зависимости плотности тепловых нейтронов от расстояния между источником и индикатором, от диаметра фильтра парафинового блока, окружающего индикатор и источник; распределения интенсивности вторичных гамма-квантов в породах с различной пористостью; вторичного гамма-излучения от интенсивности излучения и пористости пород.

Как видно, в Спецлаборатории были разработаны не только самые первые, но и самые необходимые основы для определения принципиальных вопросов разработки новых производственных методов. В измерительную схему прибора нейтронного каротажа, как и в США, была включена для регистрации гамма-квантов ионизационная камера. Однако, как показал опыт ВНИИГеофизики, ионизационные камеры были слишком грубым индикатором и требовалось найти какие-то другие счетчики, пригодные для работы в скважинах. Еще в 30-х годах в Радиевом институте применялись разрядные счетчики Гейгера—Мюллера для подсчета космического излучения С.Н. Верновым и Г.В. Горшковым (Вернов, 1934). Использовать их в приборах НК и НГК и предложил Г.В. Горшков.

Следует отметить, что именно в Спецлаборатории стали впервые применять разрядные счетчики в приборах радиоактивного каротажа. Только через несколько лет — в начале 50-х годов в США отказались от ионизационных камер в приборах нейтронного каротажа и также перешли к использованию счетчиков Гейгера—Мюллера.

О результатах работ Спецлаборатории как о первом практическом применении ядерных излучений в промышленности был поставлен в известность академик И.В. Курчатов, одобливший эти работы.

ПОИСКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА

Самые общие принципы теории нейтронного каротажа были изложены создателем этого метода Б.М. Понтекорво в 1941 г. Результаты его исследований в скважинах достаточно убедительно показали наличие связи между интенсивностью регистрируемого излучения (как нейтронов, так и гамма-квантов) и особыми "нейтронными" свойствами горных пород стенок скважин. Имеются в виду прежде всего замедляющие и диффузионные свойства пород, влияющие на изменение величины среднего пу-

ти пробега быстрых нейтронов от источника до их полного замедления и величину пути, пройденного медленными нейтронами до захвата их ядрами элементов, входящих в состав пород.

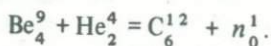
Неоднородность и многообразие состава горных пород чрезвычайно усложняли задачу. Необходимо было представить общую картину взаимодействия нейтронов с породами, выбрать основные реакции и на этом основании создать физическую модель процесса нейтронного каротажа. Построенная на основании теоретических расчетов модель должна была имитировать реальные или близкие к реальным условиям залегания горных пород в нефтяных скважинах.

Первая попытка у нас в стране дать расчетную формулу распределения плотности тепловых нейтронов при нейтронном каротаже была сделана Г.В. Горшковым и Н.М. Лятковской (1946).

Авторы рассмотрели идеальный случай точечного источника излучений в произвольно выбранной точке. Стремясь упростить расчетные формулы, они приняли условие совмещения индикатора с радиово-бериллиевым источником, а окружающей средой выбрали воду. Только при таких условиях можно было использовать рекомендованную Э. Ферми эмпирическую формулу расчета распределения нейтронов, замедленных в воде и парафине (Amaldi, Fermi, 1936). Однако принятые допущения обесценили полученные результаты. Проверка на модели расчетов и воспроизведение начальных условий (совмещение индикатора и излучателя в одной точке) не дали возможности выделить при регистрации гамма-квантов эффект замедления породой быстрых нейтронов на сильном фоне собственного гамма-излучения источника. А распределение нейтронов в воде, полученное расчетным путем, не могло давать даже приближенного представления о распределении нейтронов в горных породах из-за влияния входящих в их состав ядер элементов. В связи с этим полученная Г.В. Горшковым и Н.М. Лятковской довольно простая формула для определения интенсивности вторичного гамма-излучения не могла быть использована ни в расчетах параметров конструкции прибора, ни в теории нейтронного каротажа нефтяных скважин.

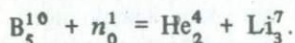
Вторая работа по теории нейтронного каротажа была опубликована в 1948 г. Ю.П. Булашевичем. Он указал на недостаточную строгость расчета Г.В. Горшкова и Н.М. Лятковской, которые, по его мнению, наряду с интересным экспериментальным материалом использовали частную эмпирическую закономерность, полученную в опытах. Ю.П. Булашевич исследовал распределение нейтронов, излучаемых точечным источником в бесконечной однородной среде, и рассчитал нейтронные константы некоторых пород и минералов на основе экспериментальных данных.

Он полагал, что процесс нейтронного каротажа должен включать следующие этапы. В скважине излучаются быстрые нейтроны в результате, например, такой реакции:



Эти нейтроны испытывают торможение в буровом растворе, заполняющем скважину, и образуют вокруг источника облако медленных

нейтронов, плотность которого существенно зависит от химического состава среды и, следовательно, варьирует в зависимости от типа горных пород. Если для измерений применять камеру, заполненную фтористым бором, то плотность медленных нейтронов можно измерять по ионизационному эффекту при захвате нейтронов изотопами бора в соответствии с возможной реакцией



Изменение плотности тепловых нейтронов при перемещении прибора по стволу скважины может дать представление об изменении литологического состава проходимых пород. Ю.П. Булашевич рассмотрел также возможность захвата медленных нейтронов ядрами атомов. Он считал, что от распределения плотности медленных нейтронов и их поглощения горными породами должен зависеть ионизационный эффект, регистрируемый счетчиком Гейгера—Мюллера на некотором расстоянии от источника. И в этом случае создавалась возможность дифференциации пород геологического разреза методом нейтронного гамма-каротажа независимо от наличия стальных обсадных труб.

Ю.П. Булашевич дал расчет распределения вторичного гамма-излучения в различных горных породах в зависимости от расстояния между источником и индикатором, а также составил таблицу нейтронных констант горных пород и минералов. Для глин, песчаников, доломитов, известняка, кварцита, ангидрита, воды, нефти им были вычислены: длина среднего пробега нейтрона от одного рассеяния до другого; средний пробег нейтронов до точки захвата; диффузионная длина; коэффициент диффузии нейтронов; среднее время жизни тепловых нейтронов.

Теория нейтронного каротажа, по мнению Ю.П. Булашевича, должна учитывать торможение нейтронов в горных породах. Но поскольку этот процесс был недостаточно изучен, введение нового параметра — тормозной длины пробега нейтронов — могло бы сильно усложнить интерпретацию каротажных диаграмм. Поэтому он предположил, что торможение нейтронов происходит не в горной породе, а в заполненной жидкостью скважине, и рекомендовал ввести парафиновые обкладки источника, которые служили бы замедлителем нейтронов и обеспечили бы возможность полного торможения нейтронов в самом приборе до проникновения их в горные породы.

В дальнейшем Ю.П. Булашевич (1951) указывал, что на значительных расстояниях от источника следует учитывать замедление быстрых нейтронов, но продолжал считать возможным учет замедления быстрых нейтронов только при каротаже незаполненных водой скважин. Статьи Г.В. Горшкова, и особенно Ю.П. Булашевича, представляли определенный вклад в теорию.

В иностранной печати до 1951 г. не было опубликовано систематического и полного изложения теории и сущности физического процесса при нейтронном каротаже. Взаимодействие тепловых нейтронов с ядрами элементов окружающей среды, как считали тогда, могло сводиться к двум конкурирующим процессам — рассеянию и захвату нейтронов.

При рассеянии нейтроны могли испытывать упругое соударение с ядрами элементов пород и оставаться свободными, при захвате — нейтроны теряют самостоятельное существование. И в том и в другом случае можно зарегистрировать реакцию горных пород на облучение тепловыми нейтронами и на этом основании судить о литологическом составе этих пород. Во многих работах теоретическая часть ограничивалась принципиальной схемой взаимодействия излучений с ядрами элементов пород. Некоторые вопросы интерпретации разрабатывались Ф. Расселом, К. Гудменом и Г. Фироном.

Более полное решение задачи распределения нейтронов в породах и интенсивности гамма-излучения с учетом замедления нейтронов в водородосодержащих средах впервые у нас удалось сделать в 1950—1953 гг. С.А. Кантору (1955). Им была решена задача для случая, когда источник распределен на бесконечной плоскости, а граница раздела сред параллельна этой плоскости. Затем метод решения одномерной задачи был положен в основу решения задачи с коаксиальной границей раздела двух сред, т.е. задачи, условия которой более близки к реальной скважине. С.А. Кантор принял, что источник быстрых нейтронов является монохроматическим, замедление происходит только в результате упругих соударений и не учитывал замедления быстрых нейтронов на тяжелых ядрах (в водородосодержащем пласте), а также захвата нейтронов в процессе замедления и влияния замедления химической связи элементов на процесс. Им впервые были получены зависимости длины замедления быстрых и среднего времени жизни тепловых нейтронов, средней длины их диффузии в зависимости от влагонасыщенности и минерализации горных пород.

Б.Г. Ерозолимский и С.А. Кантор провели некоторые расчеты исходя из соответствующей принципиальной схемы в условиях идеализированных сред и ограниченной конфигурации источника излучений. С.А. Кантору удалось правильно физически сформулировать постановку задачи и решить ее достаточно строго для простых случаев. Он получил выражение, связывающее распределение плотности замедления надтепловых и тепловых нейтронов. Попытки найти выражение для пространственно-энергетического распределения быстрых нейтронов в водородосодержащем пласте и распределения плотности тепловых нейтронов закончились выводом функции распределения плотности тепловых нейтронов. Благодаря этому появилась возможность вычислять распределение плотности тепловых нейтронов в горных породах на различных расстояниях от источника.

С.А. Кантором выведено также выражение, описывающее распределение интенсивности вторичного гамма-излучения в водородосодержащем пласте, и, таким образом, удалось корректно выявить зависимость интенсивности нейтронного и вторичного гамма-излучения около индикатора от водородонасыщенности горных пород и определить зависимость интенсивности этих излучений от расстояния между источником и индикатором.

В дальнейшем было установлено, что распределение плотности тепловых нейтронов и вторичного гамма-излучения в водородосодержащих средах определяется в основном процессом замедления быстрых нейтро-

нов и значительно меньше зависит от диффузии тепловых нейтронов. Отсюда следовало, что диаграммы НК и НГК должны отражать водородосодержание горных пород. Плотность тепловых нейтронов зависит от расстояния между источником и индикатором, и в первом приближении эта зависимость может быть выражена экспоненциальным законом. Вторичное гамма-излучение также меняется от расстояния между источником и индикатором по закону, близкому к экспоненте. Экспоненциальные зависимости были подтверждены впоследствии на практике.

Оказалось также, что на распределение нейтронов и вторичного гамма-излучения существенное влияние оказывает химический состав горных пород. От химического состава пласта зависят замедляющая способность породы, диффузионные и поглощающие свойства, а также спектр вторичного гамма-излучения. И хотя эти зависимости были известны и ранее, но благодаря выведенным формулам появилась возможность провести количественную оценку этих факторов.

После первых теоретических работ, проведенных в Спецлаборатории С.А. Кантором, и экспериментальных исследований на моделях Б.Г. Ерозолимского возникли новые практические и теоретические вопросы. В 1947–1949 гг. экспериментальные исследования усиленно проводились А.А. Коржевым и В.Ф. Печерниковым. Большие коллективы ученых начали интенсивно заниматься экспериментальными исследованиями, конструкторской разработкой приборов радиоактивного, и в том числе нейтронного, каротажа. Одновременно создавалось особое, теоретическое направление в решении задач ядерной геофизики.

Помимо Г.В. Горшкова, Ю.П. Булашевича, С.А. Кантора этими сложными математическими задачами стали успешно заниматься С.А. Денисик, И.Г. Дядькин, А.Л. Поляченко, Р.А. Резванов, В.Е. Лебедев, К.И. Якубсон, Д.А. Кожевников и другие.

РАЗРАБОТКА ОПЫТНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА И ПЕРВЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Проектирование и изготовление отдельных частей скважинного прибора и наземной аппаратуры начались еще во время испытаний первого макета, когда выяснилась возможность его практического применения. В создании первых автоматических станций РК решающее значение имела организованная Б.Б. Лапуком научная и производственная кооперация. В Спецлаборатории Московского нефтяного института под руководством Л.С. Полака была создана электронная измерительная схема. Наружный кожух скважинного прибора спроектирован и изготовлен специализированной организацией нефтяного машиностроения (Гипронефтемаш). Герметичный ввод электрического питания и вывод данных для записи на поверхности изготовлялся по чертежам Института прикладной геофизики, имевшего большой опыт в конструировании и использовании геофизических приборов в подобных условиях. В результате объединенных усилий за несколько месяцев был построен образец прибора, работоспо-

собного в агрессивных средах при давлении свыше 400 атм и температуре до 80°C.

Изготовленный образец был подвергнут новым испытаниям, задачей которых была не только проверка работоспособности прибора в реальных скважинных условиях, но, что самое главное, проверка эффективности измерений нейтронных параметров для определения состава горных пород в разрезе нефтяных месторождений.

Первые испытания были проведены в феврале 1948 г. под руководством Л.С. Полака в московских водяных скважинах Метростроя (на Октябрьской площади г. Москвы) и Института курортологии. Результаты испытаний во всех деталях рассматривались Ученым советом лаборатории. Насколько подробно вникал Ученый совет в детали, говорит следующее. Поскольку показания измерений могли зависеть от расстояния между индикатором и источником излучений, Ученый совет рекомендовал увеличить длину кожуха прибора. Совет рекомендовал ввести одновременную непрерывную и автоматическую регистрацию нескольких параметров и начать разработку комплексного прибора для различных методов каротажа.

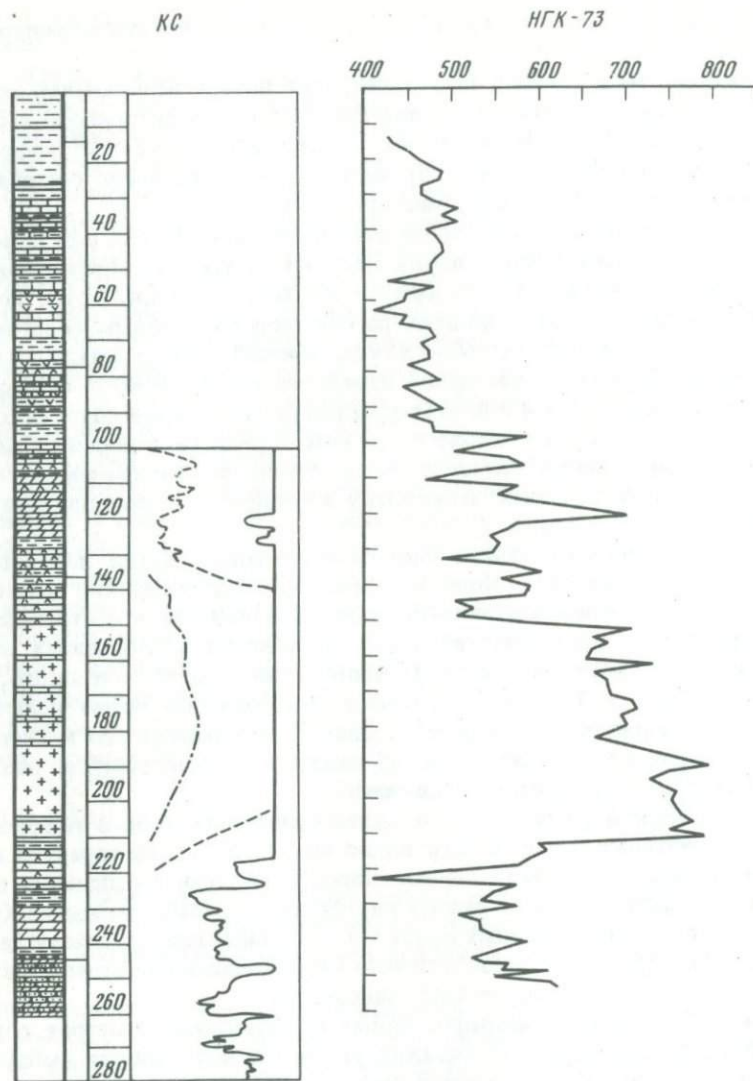
В начале полевого сезона экспериментальная партия лаборатории (начальник партии Л.С. Полак) выехала в Куйбышевский нефтеносный район. Измерения естественной радиоактивности и нейтронных параметров были проведены в старых неработающих скважинах нефтяных промыслов Калиновского, Новостепановского, Яблоневского, Султангуловского и Тархановского месторождений. Во время испытаний прибора приходилось усовершенствовать его конструкцию и схему. В результате за полевой сезон удалось записать 31 диаграмму, из них 29 с точечной и 2 — с непрерывной записью.

Геологический разрез скв. 16 Султангуловского района типичен для многих нефтяных районов. Как видно из рис. 8, общий характер изменения физических свойств горных пород и выделение отдельных пачек пластов и пропластков на разных каротажных кривых совпадают. Кроме того, из анализа приведенных кривых можно было сделать важное заключение — интерпретация одной отдельно взятой записи или отдельно взятого параметра не всегда может быть однозначной.

Таким образом, регистрация новых физических параметров горных пород в разрезе нефтяных скважин увеличила возможность выбора рационального комплекса более информативных методов.

Проведенные испытания прибора доказали возможность измерения естественной радиоактивности горных пород в закрепленных стальными трубами скважинах и выделения в разрезе на основании полученных записей слоев разного литологического состава (песчаники, глины и др.). Эти результаты оказали решающее влияние на психологию промысловых геологов, поверивших в возможности методов ядерной физики при исследованиях нефтяных скважин.

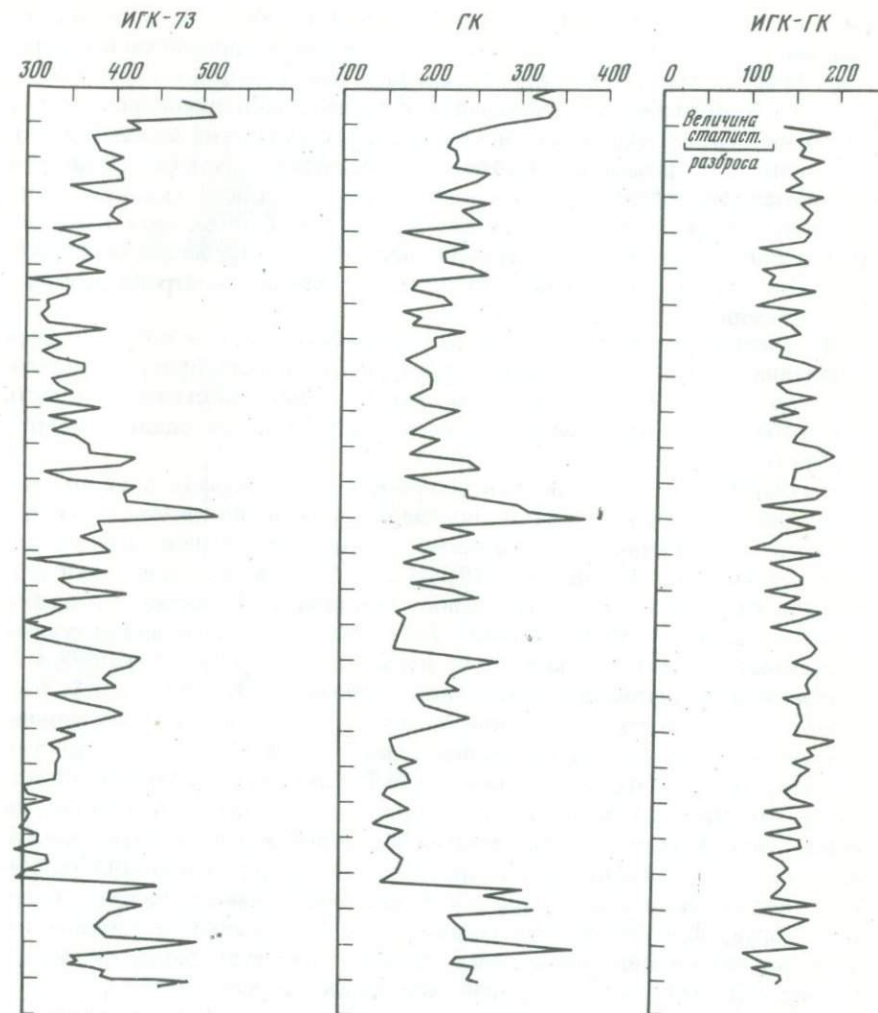
С помощью нового метода представлялось реальным осуществлять и наблюдения за изменением состояния водо- и нефтенасыщенности пластов и горизонтов в процессе эксплуатации скважин, т.е. проводить действенный прямой контроль за разработкой нефтяных залежей.



Р и с. 8. Диаграммы радиоактивного и электрического каротажа скв. 16 Султангуловского района Куйбышевской обл.

Задача контроля за продвижением контура воды и нефти в скважинах с начала 50-х годов стала приобретать все большее значение в связи с широким введением методов законтурного и внутриконтурного заводнения нефтяных месторождений. Особо важное значение в решении проблемы контроля оказали нейтронные методы.

Таким образом, создание нейтронных методов определения водородонасыщенности пластов и нейтронного каротажа нефтяных скважин, с помощью которого осуществлялся контроль за геологическим



процессом при эксплуатации нефтяных месторождений, можно считать первым приближением к решению проблемы использования методов ядерной физики в нефтедобывающей промышленности.

На совещании главных геологов нефтедобывающих трестов Куйбышевгаз, Кинельнефть, Бугурусланнефть в г. Похвистнево Куйбышевской области 22 сентября 1948 г. еще до окончания испытаний были обсуждены полученные к тому времени результаты. В решении по докладом начальника партии Л.С. Полака и профессора Б.Б. Лапука был одобрен но-

вый метод, а для ускорения создания методики интерпретации данных радиоактивного каротажа нефтедобывающие тресты предложили в середине 1949 г. пробурить одну-две специальные скважины глубиной до 1700 м в Куйбышевско-Бугурусланской нефтегазовой провинции, причем во время бурения обеспечивались отбор образцов горных пород (керн) и условия для детального изучения геологического разреза по заранее разработанной программе. Стоимость каждой подобной скважины составляла в то время примерно 1 млн. руб. Таким образом, геологи нефтепромысловых трестов подтвердили насущную потребность нефтяной промышленности в создании методов исследования и контроля работающих скважин.

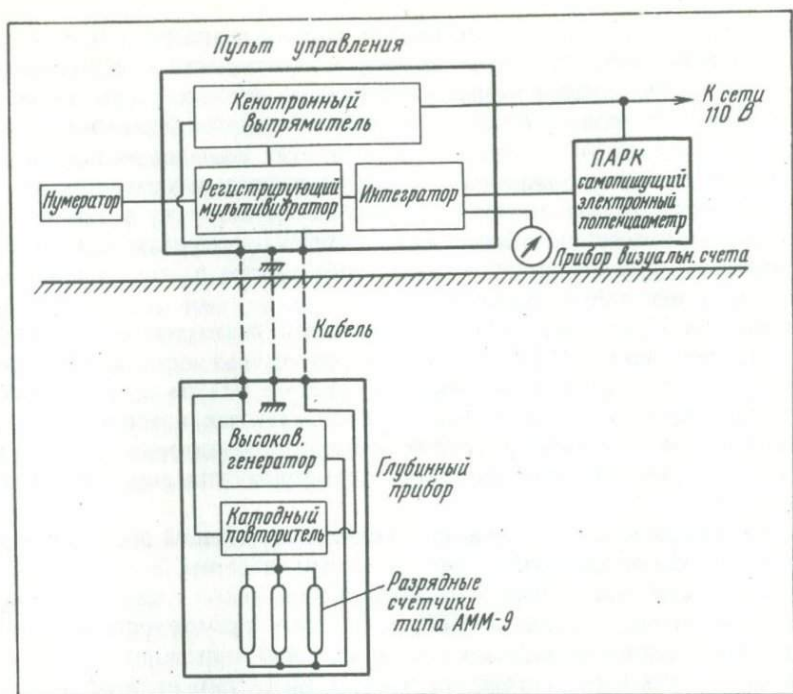
В решении совещания указывалось на необходимость всемерного форсирования разработок метода и аппаратуры Спецлабораторией с тем, чтобы до конца 1949 г. нефтяная промышленность смогла получить для работы на промыслах автоматические станции радиоактивного каротажа.

Результаты промышленных испытаний первого макета прибора рассматривались Ученым советом, подтвердившим необходимость предложенного геологами-промысловиками ускорения темпов разработки метода и аппаратуры. Однако решение Ученого совета и пожелания геологов в намеченные сроки не удалось выполнить. Из состава Спецлаборатории в декабре 1948 г. выбыл Л.С. Полак. Основные аппаратурные и схемные разработки, монтаж и испытания проводил оставшийся в лаборатории единственный специалист по радиоэлектронике — Д.Ф. Беспалов. Только через год по инициативе Г.Н. Флерова в лабораторию пришли крупнейшие физики, принявшие участие в фундаментальных исследованиях по атомной энергии, — Б.Г. Ерозолимский и Г.А. Столяров и конструктор физических приборов Г.Р. Гольбек. Активную помощь Спецлаборатории (финансирование работ и изготовление приборов) оказывало Министерство нефтяной промышленности СССР. Министр нефтяной промышленности М.А. Евсеев и главный инженер Главного управления геофизических работ В.В. Федынский принимали все меры для обеспечения выполнения научных планов по созданию метода и аппаратуры нейтронного каротажа нефтяных скважин.

В 1949 г. совместно с одним из приборостроительных заводов Спецлаборатория разработала специальную передвижную станцию радиоактивного каротажа. В комплект станции входили автоматические регистраторы, разработанные Конструкторским бюро нефтяного приборостроения, скважинный прибор и оборудование для его спуска и подъема, а также приспособления для транспортировки и хранения источников радиоактивных излучений.

Первый опытный образец станции был испытан сначала в Москве, а затем на нефтяных промыслах треста Куйбышевгаз и объединения Краснодарнефть.

Интерес к результатам проверки первого нейтронного метода исследования работающих нефтяных скважин был настолько велик, что по предложению члена Ученого совета академика А.В. Топчиева в декабре 1949 г. было созвано специальное совещание при Президенте Акаде-



Р и с. 9. Блок-схема серийной аппаратуры радиоактивного каротажа

мии наук С.И. Вавилове. В результате обсуждения на этом совещании в план Научно-технического совета при Президенте АН СССР была включена соответствующая исследовательская работа. Кроме того, Академия наук оказала существенную помощь в обеспечении Специлатории необходимыми источниками радиоактивных излучений, получение которых в то время представляло весьма трудную задачу.

К середине следующего, 1950 г., было закончено изготовление и комплектование еще трех станций с автоматической регистрацией данных непосредственно на скважине в процессе измерений (рис. 9). Для испытаний станций радиоактивного каротажа были выбраны нефтепромыслы Саратова, Краснодара и Башкирии, так как необходимо было получить исчерпывающие данные о применимости метода вообще, а также о работоспособности аппаратуры в разнообразных условиях как геологических, так и климатических.

В Саратовской области нефтяные и газовые месторождения представлены, как правило, карбонатными породами, исследование которых методами электрического каротажа встречало значительные трудности. Кроме того, в разрезах нефтяных месторождений здесь встречаются породы самого разнообразного литологического состава. Район уже был достаточно хорошо изучен геологами, что позволяло сопоставить полученные новым методом результаты с имеющимися материалами, давало возможность отработать методику измерений и интерпре-

тации получаемых данных. Опробование метода и аппаратуры в Краснодаре должно было дать представление о пригодности и целесообразности применения радиоактивного каротажа в районах с малоизвестным и сложным геологическим строением. В районах Ишимбая и Карповки Башкирской АССР представляли интерес исследования радиоактивными методами проницаемых разностей рифогенных известняков.

В результате работы станций радиоактивного каротажа в течение года на нефтяных месторождениях были собраны материалы для оценки геологической эффективности методов нейтронного и гамма-каротажа при исследовании нефтяных скважин.

Геологи вместе с геофизиками и физиками рассматривали полученные материалы НГК и ГК с точки зрения возможности корреляции разрезов скважин, расчленения их на отдельные пласты и горизонты, выделения нефтеносных и газоносных продуктивных пластов, а также принципиальной возможности количественного определения пористости пластов, которая является основным параметром для определения запасов нефти.

Первые геологические результаты применения станций радиоактивного каротажа можно сформулировать следующим образом.

1. На примере исследований саратовских нефтяных месторождений было установлено, что данные НГК и ГК дают возможность корреляции разрезов нефтяных скважин. На нескольких отстоящих друг от друга на 3 км и более скважинах удалось проследить верейский горизонт, представленный в основном песчано-глинистыми отложениями, прослеживались карбонатные породы намюра и серпуховско-окской свиты, хорошо выделялись песчано-глинистые отложения девона. На записях особенно четко были видны границы песчаников, алевролитов и глин. Данные НГК и ГК в пределах карбонатной толщи позволили установить наиболее характерные реперы, связанные с переходом пород от малопористых к пористым. Кроме того, по данным НГК можно судить об изменении содержания глинистого материала в породах и их пористости. Достаточно четкое отражение на кривых ГК чередования пластов глин и песчаников (или песков) позволяло проводить корреляцию разрезов даже по одной этой кривой.

Анализ материалов НГК и ГК в Саратове достаточно убедительно показал возможность корреляции разрезов нефтяных скважин по данным радиоактивного каротажа в районах, где литологический состав слагающих разрезов горных пород изменяется по площади.

2. Возможности расчленения разреза выяснялись путем сопоставления данных радиоактивного каротажа с геологическими материалами.

Было подтверждено, что малопористые (плотные) карбонатные породы — известняки и доломиты — отмечаются на кривой НГК максимумами. Пористым (проницаемым и глинистым) карбонатным породам соответствуют меньшие значения ГК и НГК, а глины выделяются резкими минимумами НГК, что наблюдалось во всех исследованных скважинах в Саратове, Краснодаре и Башкирии.

Особую трудность представляло выделение песков и песчаников, которые не всегда могли быть отделены от глин с повышенной радиоак-

тивностью, встречающихся, например, на краснодарских месторождениях. Однако по максимальным значениям НГК удавалось выделить пласты малопористых сцементированных песчаников, которые по данным электрического каротажа очень трудно отличаются от нефтенасыщенных пористых пластов.

Сравнение кривых НГК и ГК давало возможность разделить пористые разности карбонатных пластов на глинистые и проницаемые. Если по показаниям НГК пласт мог быть оценен как пористый, отличался повышенными значениями и по данным ГК, то это сочетание интерпретировалось как глинистый и, следовательно, непроницаемый пласт. Если же на кривых НГК и ГК пласту соответствовали пониженные значения, то он должен был быть пористым, неглинистым, проницаемым.

В скважинах Краснодарского края карбонатным пачкам (мергелей, известняков, доломитов) соответствовали резкие максимумы на кривых НГК, а песчаным — лишь небольшие повышения. Особое значение имело выделение маломощных (около 1 м) пластов в скважинах Краснодара.

3. Разделение нефтеносных и водоносных пластов и горизонтов в разрезе нефтяных скважин по данным радиоактивного каротажа не могло быть проведено. Пласты, насыщенные нефтью, водой или газом, отмечались на кривых НГК и ГК как водородосодержащие. Значительно позднее для решения этого вопроса стали разрабатываться другие ядерно-физические методы, на первом же этапе применения и разработки методов радиоактивного каротажа все попытки доказать применимость методов НГК и ГК для разделения нефтеносных и водоносных пластов оказывались безуспешными.

Станции радиоактивного каротажа, несколько усовершенствованные в последующие годы, использовались для установления зависимости поля естественной радиоактивности от геологического строения района. Так, при изучении мезозойских и третичных отложений Прикаспийской впадины было установлено постоянство величины естественной радиоактивности чистых глин на обширном пространстве (Полак, 1952). Это дало возможность Л.С. Полаку высказать предположение об особенностях геологических процессов этого района. Постоянство естественной гамма-активности глин по всему разрезу скважин он считал доказательством того, что радиоактивные элементы не поднимались с мигрирующими водами из глубинных (в том числе изверженных) пород, а адсорбировались частицами ила, ставшего впоследствии глинистой породой. Отмеченное постоянство естественной радиоактивности пород могло также указывать на постоянство процесса миграции и распределения элементов в течение длительного геологического времени.

Л.С. Полак обратил внимание на независимость естественной радиоактивности отдельных пород от глубины их залегания или от возраста; не была отмечена коррелятивная связь естественной радиоактивности горных пород с содержанием в них карбонатов, а также с полной пористостью; не отмечено в явном виде связи средней удельной поверхности зернистой породы с содержанием в ней глинистых фракций. Несмотря на это, Л.С. Полаку удалось по полученным

данным вывести логарифмический закон коррелятивной связи естественной радиоактивности пород с содержанием в них глинистых фракций.

После продолжительной работы станций радиоактивного каротажа в производственных условиях Урало-Эмбенского нефтеносного района были получены достаточно убедительные данные для стратиграфического и литологического разделения мезозойских и третичных отложений.

Определение геологической эффективности первых ядерно-физических методов исследования нефтяных скважин было предметом особого внимания со стороны Министерства нефтяной промышленности и Академии наук СССР.

Одобрила новый метод после весьма подробного и даже придиричьего рассмотрения материалов по радиоактивному каротажу нефтяных скважин комиссия Министерства нефтяной промышленности СССР, в состав которой входили геофизики, промысловые геологи, инженеры нефтедобывающих трестов и представители различных нефтяных и физических организаций.

Кроме того, отчет Спецлаборатории о разработке метода и аппаратуры нейтронного каротажа буровых скважин получил высокую оценку на заседании Научно-технического совета при Президенте АН СССР 20 декабря 1950 г.

Отчет Спецлаборатории был заслушан и обсужден также Научно-техническим советом Министерства нефтяной промышленности СССР. В принятом решении указывалось на широкие перспективы применения методов радиоактивного каротажа для исследования скважин и осуществления контроля за разработкой нефтяных месторождений. Решение Научно-технического совета обязывало в 1951 г. изготовить 50 комплектов станций радиоактивного каротажа для их использования нефтедобывающими организациями. С 1951 г. автоматические станции радиоактивного каротажа начали изготавливаться на заводах Министерства нефтяной промышленности, и с этого времени первые производственные методы нейтронного и гамма-каротажа стали широко внедряться для исследования нефтяных месторождений.

СОЗДАНИЕ СЕТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО РАДИОАКТИВНЫМ МЕТОДАМ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Производственное освоение нового метода геофизических исследований нефтяных скважин проходило по инициативе и при научной и технической помощи Московского нефтяного института (МНИ), Научно-исследовательского института прикладной геофизики (НИИПГ) и треста Азнефтегеофизика. Существенное влияние на возобновление этих работ в специализированных геофизических организациях оказали успехи лаборатории МНИ в разработке нейтронного метода и создании соответствующей аппаратуры.

В 1948–1949 гг. в НИИПГ также велись работы по усовершенствованию метода и аппаратуры измерения естественной радиоактивности горных пород и внедрению их в производство. Одним из самых опытных специалистов в этой области был А.А. Коржев, занимавшийся разработкой методики и аппаратуры для измерения естественной радиоактивности горных пород более десяти лет. Им были предложены специальные устройства и способы гамма-каротажа (Коржев, 1945, 1946). В 1946–1947 гг. под его руководством были изготовлены опытные образцы приборов ГКС-1, ГКС-2 и ГКС-3, которые прошли испытания на нефтяных промыслах Грозного и в Средней Азии.

А.А. Коржев дал рекомендации по использованию гамма-каротажа для корреляции геологических разрезов отдельных скважин по интенсивности естественного гамма-излучения, являющейся устойчивой характеристикой пласта. Он обратил внимание, что особенно четко на диаграммах выделяются контакты глин с песчаниками, известняками и другими литологическими разностями. Повышенная радиоактивность этих зон объяснялась способностью глин адсорбировать из естественных растворов ионы легкорастворимых урановых солей и газообразных продуктов распада радиоактивных элементов. Поскольку "контактный эффект" глин прослеживался, как правило, по всему простиранию пласта, А.А. Коржев предложил использовать соответствующие повышения радиоактивности для корреляции разрезов нефтяных скважин.

В НИИПГ в 1948 г. возобновились работы и по нейтронному методу. Под руководством В.Ф. Печерникова (1948 а, б) были проведены опыты на модели скважины, использовался макет прибора с нейтронным и гамма-излучателем. Проводилось сравнение записи нейтронного каротажа при разных расстояниях между источником и детектором. Новым в исследованиях В.Ф. Печерникова по сравнению с аналогичными исследованиями Спецлаборатории МНИ было установление влияния на результаты изменений не только водородосодержания, но и плотности среды.

Интересным было предложение В.Ф. Печерникова и А.А. Коржева (1948) об использовании в приборе для гамма-нейтронного каротажа двух источников излучений: "радий + бериллий" и "радий". Регистрация реакции горных пород на облучение двумя источниками должна была производиться одновременно соответствующими счетчиками, разделенными свинцовым экраном.

В производственном тресте Азнефтегеофизика инженеры Е.Ф. Глазов и С.М. Аксельрод самостоятельно вели отработку методики и аппаратуры радиоактивного каротажа. С середины 1948 г. они начали отработку методики для условий Азербайджана, поскольку только радиоактивный каротаж мог помочь в восстановлении геологической документации многих заброшенных, но еще потенциально продуктивных нефтяных скважин, а также в выявлении пропущенных нефтеносных горизонтов на старых бакинских месторождениях.

Изготовление работоспособного прибора радиоактивного каротажа представляло для производственников-геофизиков значительные трудности не только из-за недостаточности знаний о сущности физического процесса измерений, но и из-за отсутствия необходимых радиотехнических деталей. В качестве теоретической основы использовались результаты физических исследований, проведенных в НИИПГ, МНИ и Радиевом институте. При сборке прибора, работоспособного в условиях повышенных скважинных температур, Е.Ф. Глазов был вынужден использовать даже нестандартные или случайно найденные трофейные радиолампы и сопротивления. В связи с этим сконструировать работающую стабильно аппаратуру стоило ему большого труда и терпения. Но еще труднее было подбирать замену деталям, выходящим из строя в процессе монтажа и на всех других стадиях изготовления и регулирования аппаратуры. Несмотря на все эти трудности, в течение года станция радиоактивного каротажа треста Азнефтегеофизика была создана, и в IV квартале 1949 г. начались ее промышленные испытания на промыслах Азербайджана. Аппаратура оказалась работоспособной, были получены четкие записи естественного гамма-излучения горных пород, нейтронных характеристик и нейтронного гамма-каротажа разреза нефтяных скважин.

Итак, к концу 40-х годов были независимо созданы три мало отличающиеся друг от друга конструкции станций радиоактивного каротажа: в лаборатории Московского нефтяного института, НИИПГ и в тресте Азнефтегеофизика. Станции были немедленно включены в производственную работу в различных нефтедобывающих районах страны.

ПЕРВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПАРТИИ РК НА НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛАХ

Первая производственная партия радиоактивного каротажа была организована в Башкирии в 1948 г. Ее задачей было выяснить эффективность радиоактивных методов исследования скважин при решении геологических задач на месторождениях Башкирии. За два года тематическая партия добилась существенных результатов и внесла определен-

ный вклад в разработку методики измерений и основ геологической интерпретации диаграмм гамма- и нейтронного гамма-каротажа.

Для Башкирии практическое использование результатов измерений естественной радиоактивности горных пород разреза нефтяных месторождений имело особое значение. Дело в том, что одним из основных показателей, учитываемых при проектировании разработки нефтяных месторождений, является пористость продуктивных пластов, определяемая по образцам пород и по геофизическим данным. Методы электрического каротажа, широко и успешно применяемые для этих целей в других нефтеносных районах, для определения пористости характерных карбонатных отложений Башкирии оказались неэффективными. Получаемые в то время материалы радиоактивных исследований скважин могли давать лишь качественную картину разреза. Поэтому была разработана методика интерпретации измерений естественной радиоактивности горных пород и определены искажения, которые вносят в измерения оборудование и конструкция скважины. С учетом возможного влияния непостоянства ее диаметра по глубине, обычного для реальных условий, разница между лабораторным определением пористости и по данным ГК составляла примерно 25%. В связи с этим в тематической партии была проведена работа по определению оптимальных условий проведения радиоактивного каротажа и путей повышения точности получаемых на скважинах материалов.

К заслугам Башкирской тематической партии и ее сотрудников Ю.А. Гулина, И.Г. Дядькина, Ф.Г. Баебитова относятся выяснение причин нелинейности показаний аппаратуры РК, выбор постоянной времени интегрирующей ячейки, определение оптимальной скорости проведения замеров в скважине и некоторые другие усовершенствования техники и методики проведения радиоактивного каротажа в нефтяных скважинах. Предложения тематической партии обсуждались и принимались к сведению научными сотрудниками лаборатории МНИ и НИИПГ. Этой партией впервые была доказана возможность выявления новых нефтеносных пластов в старых обсаженных скважинах на основании совместного анализа данных ГК, НГК и других геофизических и геологических материалов. В результате испытаний в ряде скважин была получена промышленная нефть.

Ю.А. Гулин показал возможность применения индикаторов большой длины, поскольку записи гамма-излучения мало отличались для индикаторов длиной в 30 и 60 см, возможность отбивки границ пластов по диаграммам РК по точке начала спада и подъема кривых и т.д.

С конца 1953 г. тематическая партия радиоактивного каротажа Башнефтегеофизики под руководством Ю.А. Гулина начала разрабатывать методы количественной интерпретации диаграмм РК, в частности определения пористости горных пород. Выводы Ю.А. Гулина о пропорциональности регистрируемой и истинной интенсивности гамма-излучений, справедливые для пластов различной мощности, имели особое значение для количественной интерпретации. Он показал также, что достаточно удовлетворительные результаты определения плотности горных пород могли быть достигнуты при использовании метода гамма-

гамма каротажа (ГГК). По данным ГГК можно определять и пористость этих пород, если справедливо допущение о постоянстве плотности пород одной и той же литологической группы.

В тематической партии рассматривалась также возможность комплексной интерпретации методов ГГК и НГК. Поскольку НГК позволяет определять водородосодержание пород, в частности за счет наличия кристаллизационной воды, в лаборатории пришли к выводу, что сопоставление записей ГГК и НГК должно дать возможность определения пористости и содержания в породах химически связанной воды. По тем же данным в сочетании с результатами ГК могла быть разработана методика определения глинистости пластов, что имело также большое практическое значение, поскольку нефтеносные пласты отделены от других пород плотными глинистыми покрывками, не дающими нефти и газу мигрировать из нефтяной залежи и тем самым сохраняющими залежь.

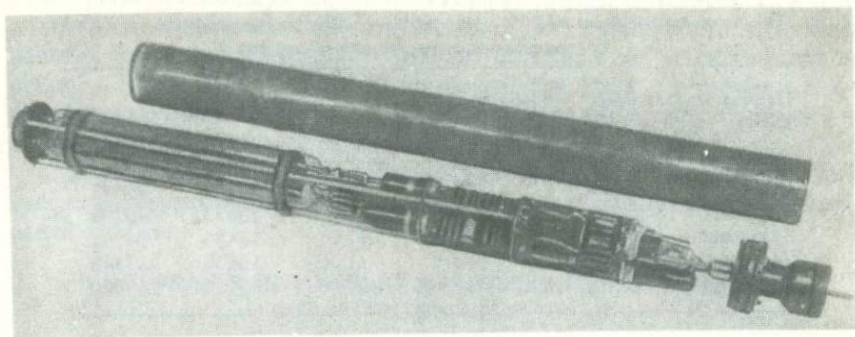
Не менее важные работы по разработке методики и интерпретации результатов измерений проводились в тематической партии Азнефтегеофизики под руководством С.М. Аксельрода.

ПРИЗНАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБЯЗАТЕЛЬНЫМИ ПРИ ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Широкое применение нового ядерно-физического направления в геофизических исследованиях стало возможным благодаря созданию промышленных образцов аппаратуры.

В результате испытаний первых трех станций к началу 1951 г. их конструкция была достаточно отработана. В течение последующих трех месяцев заводу "Нефтеприбор" были переданы исправленные схемы и чертежи, технические условия, инструкция по эксплуатации и другая техническая документация. На заводе все время находился прикрепленный инженер-конструктор из лаборатории МНИ, а в случае необходимости и любой научный сотрудник был обязан оказывать немедленную помощь. Благодаря гибкой организации взаимоотношений институт — завод было выпущено в 1951 г. 16, а в 1952 г. 18 станций радиоактивного каротажа (рис. 10). По распоряжению Главного управления геофизических работ Министерства нефтяной промышленности СССР, принятому в соответствии с решением научного совета лаборатории МНИ, эти станции были направлены для работы в нефтепромысловые районы. Одновременно с изготовлением станций Главнефтегеофизика организовала курсы по подготовке операторов по радиоактивному каротажу.

Таким образом, были созданы и станции и кадры технического персонала. Можно было организовать в начале полевого сезона производственные партии радиоактивного каротажа в Башкирии, Казахстане, Узбекистане, Саратове, на Украине и в других районах. В работе первых партий приняли участие и научные сотрудники лаборатории МНИ, что ускорило внедрение новых методов и дало возможность нефтепромышленным геологам получить дополнительную информацию о разрезах разрабатываемых месторождений. Так, к партии радиоактивного каро-



Р и с. 10. Скважинный прибор станции РК, 1951 г.

тажа Туймазинской геофизической конторы в Башкирии был прикомандирован научный сотрудник МНИ О.А. Барсуков, который в течение пяти месяцев проработал непосредственно в полевых условиях. В этот период он помогал еще двум партиям, работавшим в Ишимбаевском районе. В результате работы только этих трех партий за сезон 1951 г. было исследовано 58 скважин и на интересующих геологов участках произведена запись (около 70 тыс. м).

В Башкирии находилась и исследовательская группа лаборатории МНИ. Руководитель лаборатории профессор Б.Б. Лапук прочитал для нефтепромысловиков Октябрьского и Бугульмы цикл лекций о новых методах исследования скважин. Занятия с операторами партий провели научные сотрудники О.А. Барсуков, Д.Ф. Беспалов, С.А. Кантор и Ю.С. Шимилевич. Существенную помощь в ремонте и наладке аппаратуры партиям оказал Д.Ф. Беспалов.

В Саратовскую партию выезжал руководитель исследовательской группы лаборатории Г.Н. Дарвайд, а на период освоения станции и научный сотрудник Н.А. Бекешко. Эта партия за 1951 г. исследовала 11 скважин общей глубиной около 30 тыс. м.

На Украине (в районе Стрия) в работах партии радиоактивного каротажа принимал участие научный сотрудник О.М. Арутинов. Партия исследовала 80 скважин общей глубиной более 63 тыс. м. Полученные результаты дали возможность установить границы пластов и вновь ввести в эксплуатацию скважины, заброшенные из-за отсутствия геологической документации. Причем только благодаря методам радиоактивного каротажа в пяти из них было выявлено шесть нефтеносных горизонтов, ввод которых в эксплуатацию позволил получать дополнительно около 200 т нефти в сутки.

Научные сотрудники лаборатории МНИ выезжали в партии радиоактивного каротажа Казахстана, Куйбышевской и Чкаловской областей, была оказана помощь Бугурусланской геофизической конторе и другим организациям.

Как видно из табл. 2, за 1951 г. методами радиоактивного каротажа было исследовано свыше 950 скважин (более 850 тыс. пог. м исследованных участков) в основных нефтеносных районах страны. Следует отме-

Таблица 2

**Объем выполненных в 1951 г. исследований нефтяных скважин (пог. м)
методами радиоактивного каротажа**

Нефтедобывающий район	Количество партий РК	Количество скважин	ГК	НГК
Башкирия и Татария	3	58	32735	36947
Украина	2	80	23673	40303
Казахстан	1	17	13485	24785
Саратовская обл.	1	11	10438	17340
Азербайджан	4	860	435400	130000

тить, что в Азербайджане трест Азнефтегеофизика и НИИПГ проводили исследования приборами собственной конструкции и изготовления, а в остальных районах использовались станции заводского изготовления конструкции Спецлаборатории МНИ.

Работы 1951 г. показали возможности применения новых радиоактивных методов исследования нефтяных скважин для восстановления геологической документации, а также получения дополнительной информации о геологическом разрезе, что помогало выявить новые продуктивные нефтеносные горизонты и пласты. Следует отметить, что аппаратура для проведения радиоактивного каротажа — станции РК, уже широко использовавшаяся в различных нефтеносных районах, все еще продолжала оставаться несовершенной и постепенно улучшалась в процессе эксплуатации на промыслах.

В 1952 г. число работавших на промыслах станций трех различных видов достигло 40 штук и было организовано соответствующее количество производственных партий. В то же время на промыслах работали партии электрического каротажа. Остановки бурения для проведения то радиоактивных, то электрических измерений становились слишком продолжительными. Было желательно, чтобы радиоактивные измерения проводились одновременно с исследованиями другими методами промысловой геофизики. При этом не только сократилось бы время измерения, но можно было бы использовать стандартные каротажные подъемники, кабель, регистрирующую аппаратуру и другое оборудование. Не требовалась бы специальная бригада геофизиков и рабочих. Поэтому в начале 1951 г. было решено включить в схему осваиваемой на заводе новой автоматической каротажной станции АКСЛ-51 каналы для радиоактивного каротажа. Для этого надо было выбрать наилучшую схему из трех работающих уже достаточно длительное время станций.

Министерством нефтяной промышленности СССР была создана комиссия (председатель Д.М. Сребродольский, заместитель председателя Т.Д. Ильина), которая в сентябре 1952 г. провела сравнительные испытания станций на нефтяных промыслах Башкирии. Предъявленные к испытаниям станции оказались по существу однотипными и работали на стандартном одножильном каротажном кабеле. Схемы скважинного прибора и наземной аппаратуры обеспечивали их нормальную работу и одновремен-

ную регистрацию двух параметров горных пород: естественного и нейтронного гамма-излучения. По результатам проведенных стендовых и скважинных испытаний комиссия рекомендовала принять за основу для серийного образца аппаратуру Спецлаборатории МНИ с внесением в нее рациональных элементов других станций и в связи с этим отказаться от выпуска отдельных комплексов радиометрической аппаратуры.

С 1953 г. измерения радиоактивности горных пород в разрезах нефтяных скважин включены в обязательный комплекс геофизических исследований скважин.

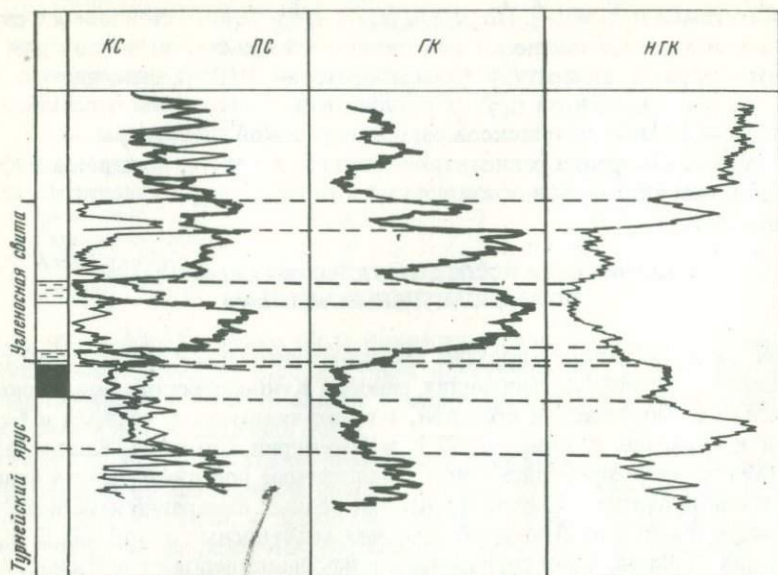
СОЗДАНИЕ СЕТИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО РАДИОАКТИВНЫМ МЕТОДАМ

Партии радиоактивного каротажа были организованы с начала 1952 г. в Краснодаре и в нефтедобывающих районах Куйбышевской, Чкаловской, Пермской и Ульяновской областей, а также значительно усилены в Башкирии и Саратове. К концу 1952 г. в Башкирии, Саратове, Краснодаре, Куйбышеве сформировались почти стационарные постоянно действующие тематические партии. Помимо производственных измерений ими были начаты исследования особенностей строения нефтеносных площадей. Эти работы, как правило, были согласованы с научно-исследовательскими лабораториями МНИ и НИИПГ, но проводились самостоятельно. Особенно важное значение имели в то время исследования Ю.А. Гулина, И.П. Дворкина и А.В. Золотова, проведенные в г. Октябрьском, и В.П. Иванкина в г. Саратове.

В 1954 г. в Саратовском Поволжье начали проводить исследования нефтяных месторождений радиоактивными методами каротажа (рис. 11). Разработка методики измерений, пригодной для геологических условий этого района, проводилась Саратовской тематической партией радиоактивного каротажа под руководством В.П. Иванкина. В первые два года опытные исследования проводились на опорной газовой скв. 27 Елшанского месторождения. Помимо радиоактивного каротажа там применили закачку радиоактивных изотопов в скважину с целью изучения коллекторских свойств пластов. Меченый радиоактивный глинистый раствор в процессе бурения проникал в пористые пласты и частично оставался в порах породы. При повторном каротаже эти пласты выделялись более отчетливо.

Для координации научно-исследовательских, конструкторских и опытно-промышленных работ по использованию радиоактивных излучений и изотопов в нефтяной промышленности на расширенных совместных заседаниях Технического совета Министерства нефтяной промышленности СССР и Научно-технического общества нефтяников 14–19 марта 1956 г. было решено создать специальный координационный совет (Применение радиоактивных изотопов, 1957).

В его состав вошли представители научно-исследовательских и конструкторских организаций, высших учебных заведений, Академии наук СССР, производственных нефтедобывающих предприятий и организаций других министерств и ведомств, ведущих работы в области применения радиоактивных излучений и изотопов в нефтяной промышленности. Коор-



Р и с. 11. Выделение нефтяного горизонта по данным радиоактивного и электрического каротажа в Саратовском Поволжье

динационный совет обязан рассматривать планы и предложения о новых работах, внедрении методов по использованию радиоактивных излучений в нефтяной промышленности.

В дополнение к Спецлаборатории Нефтяного института была организована лаборатория в Институте нефти АН СССР. Основу лаборатории составили Ю.С. Шимилевич, Д.Ф. Беспалов, С.А. Кантор, Г.Н. Дарвойд и другие участники первых разработок МНИ. Заведывание лабораторией было поручено доктору геолого-минералогических наук Ф.А. Алексею, научным руководителем остался Г.Н. Флеров. Лаборатория должна была заниматься разработкой новых ядерно-физических методов исследования скважин, усовершенствованием или созданием новой аппаратуры, отработкой общих методик проведения и интерпретации полученных данных, а также их конкретизацией для отдельных нефтяных районов страны. Начались работы по радиоактивному каротажу во ВНИИ комплексной автоматизации нефтегазовой промышленности, куда перешел Е.Ф. Глазов и где он занялся созданием термостойкой аппаратуры для использования в глубоких скважинах при температурах свыше 150°C . В конце 50-х годов произошла перегруппировка сил и в НИИПГ.

Существенные изменения произошли в составе Спецлаборатории Московского нефтяного института. В связи с тяжелой болезнью ушел из лаборатории профессор Б.Б. Лапук. Заведующим лабораторией был назначен геолог А.И. Холин, оставшийся ее бессменным руководителем более 20 лет. Лаборатория пополнилась новыми молодыми физиками и геофизиками. К работам лаборатории стала широко привлекаться студен-

ческая молодежь. Здесь прошли специальную подготовку по ядерной геофизике будущие ведущие специалисты в этой области (В.В. Ларионов, Н.В. Попов, К.И. Якубсон, Д.А. Кожевников, Р.А. Резванов, Ш.А. Губерман и др.).

В октябре 1961 г. в системе Министерства геологии СССР был создан первый и единственный в мировой практике Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ), объединивший ранее разобщенные научные силы. В него были переданы разрабатывающие ядерно-физические методы исследования горных пород подразделения ИГИРГИ (созданного на основе Института нефти АН СССР) и ВНИИГеофизики (преобразованного из НИИПГ), а также геохимические лаборатории ВНИГНИ и ВНИИГеофизики. В основные задачи ВНИИЯГГа входила разработка теоретических основ ядерно-физических методов поисков и разведки полезных ископаемых, методик и техники исследований в лабораториях, на нефтяных промыслах и в горных выработках, методов геологической интерпретации получаемых данных и обобщение результатов работ в этой области. Помимо разработки аппаратуры и приборов для ядерно-геофизических исследований ВНИИЯГГ должен был также заниматься созданием новых источников излучений, в том числе управляемых.

За короткий срок — немногим более 10 лет — в нашей стране была создана сеть научно-производственных организаций в области ядерно-физических методов изучения горных пород. К началу 60-х годов в каждом крупном нефтедобывающем районе работали тематические партии радиоактивного каротажа, представляющие собой рациональное сочетание научного поиска и производственного опыта.

СТАНОВЛЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА (1959–1960 гг.)

Радиоактивные методы исследования нефтяных месторождений в 50-е годы развивались по двум основным направлениям, в связи с чем можно выделить две обособленные группы — гамма- и нейтронные методы. Гамма-методы используют естественное гамма-излучение пород или излучение под влиянием искусственного гамма-источника. Нейтронные методы основаны на исследовании эффекта взаимодействия потока нейтронов от источника с ядрами элементов, входящих в состав окружающих прибор горных пород.

РАЗВИТИЕ ГАММА-МЕТОДОВ

Со времени создания первого метода гамма-каротажа было разработано много различных методов, использующих гамма-излучение горных пород, причем существенно менялись и совершенствовались не только методы, но и приборы. Однако все они — и ионизационные камеры, и счетчики Гейгера—Мюллера, и сцинтилляционные счетчики, и приборы с полупроводниковыми детекторами — дают возможность подсчитать суммарное количество гамма-квантов, которые попали в зону действия прибора. В результате измерений мы получаем общую интенсивность гамма-излучения на данном участке и в данный момент времени. В эту общую величину входят: а) гамма-излучение горных пород разреза скважины, б) излучение заполняющей скважину среды, в) фоновое излучение измерительного прибора, г) космическое излучение. Наибольший вклад дает гамма-излучение горных пород, представляющее самопроизвольное излучение радиоактивных элементов в виде фотонов высоких энергий порядка от 0,1 до 10 МэВ. Излучение заполняющей скважину среды в некоторых случаях бывает достаточно сильным и искажает истинную картину радиоактивности горных пород, то же относится и к фоновому излучению самого прибора. Космическое же излучение на глубинах свыше нескольких десятков метров практически не оказывает влияния на результаты измерений. Различные модификации гамма-методов и соответствующие расчетные палетки позволяют в зависимости от поставленных задач выделять из общего зарегистрированного излучения ту или иную составляющую.

Как было указано в главе III, метод гамма-каротажа, предложенный в 1937 г., был первым методом ядерной геофизики для исследования нефтяных месторождений. Созданный и впервые испытанный для целей диф-

ференциации горных пород в нефтяных скважинах, этот метод в настоящее время применяется главным образом для выявления пород повышенной радиоактивности и дает дополнительную информацию о литологии пластов.

Метод рассеянного гамма-излучения или метод гамма-гамма каротажа основан на взаимодействии источника гамма-квантов прибора непосредственно с породой. Идея метода возникла как практическое приложение известного положения ядерной физики о пропорциональности плотности вещества количеству электронов, рассеивающих гамма-излучение в единице объема вещества. Возможности практического применения измерений интенсивности рассеянного породой в скважине излучения гамма-квантов источника начали обсуждаться еще в 1949 г. в США.

Первые измерения методом гамма-гамма каротажа в нефтяных скважинах были проведены в 1950—1951 гг. в США Б. Бушем, Х. Фаулом и В. Титтлом; в СССР А.А. Коржевым, Е.М. Филипповым и др. Источником гамма-квантов служит кобальт-60. Во время измерений поток гамма-квантов источника излучений прибора вступает во взаимодействие с элементами горных пород. Поскольку число электронов, находящихся в атомах элементов горных пород, пропорционально плотности породы, то количество взаимодействий гамма-квантов источника с электронами элементов породы будет тем больше, чем плотнее порода. Поэтому на достаточно большом расстоянии от источника число поступивших на индикатор и зарегистрированных им гамма-квантов будет для плотных пород меньше, чем для рыхлых.

Было определено, что количество зарегистрированных индикатором гамма-квантов N должно изменяться в зависимости от плотности породы по известному экспоненциальному закону

$$N = N_0 e^{-CL\delta},$$

где N_0 — число гамма-квантов, испускаемых источником; δ — плотность породы; L — расстояние между источником излучений и индикатором; C — постоянная величина.

Однако расчет распределения интенсивности рассеянного гамма-излучения в реальных или близких к реальным условиям скважины является и до настоящего времени весьма сложной задачей, поэтому вначале были разработаны первые подходы к расчетам составляющих процесса на основе обобщенных физических и минералогических предположений.

Поскольку гамма-излучение источника проникает в окружающую породу всего на несколько сантиметров, методом ГГК можно достаточно подробно исследовать только ближнюю зону. Ю.А. Гулиным было показано, что наличие глинистой корки на стенках скважин существенно влияет на результаты измерений, но если толщина глинистой корки не превышает 2—3 см, то определение пористости и плотности ближней зоны по данным ГГК возможно даже без поправок.

Методом гамма-гамма каротажа решаются как общие, так и частные задачи исследования нефтяных скважин. К общим задачам относится определение плотности горных пород разреза, а также пористости, если ми-

нералогическая плотность пород сохраняется неизменной. Особенно эффективен метод ГГК для разрезов, сложенных слабосцементированными породами, содержащими газ при невысоком давлении. При этом четко выделяются газоносные и водоносные пласты.

В практике исследования нефтяных скважин метод ГГК применялся больше для решения частных задач: определения высоты подъема цемента в затрубном пространстве, характера распределения цемента и степени его разрушения, положения обсадной колонны и степени ее износа, характера заполняющей скважину жидкости, мест притока жидкости в скважину и других параметров технического состояния скважины.

Для определения плотности пород методом ГГК предварительно проводили эталонирование аппаратуры в средах известной плотности, затем полученные в скважинах данные сравнивали с эталонными и вычисляли плотность породы.

Первые образцы приборов для метода ГГК были в 1953 г. изготовлены фирмой "Мак-Кулоу" в США, а в СССР — во ВНИИГеофизике и в тресте Башнефтегеофизика.

Расчеты распределения интенсивности рассеянного излучения источника гамма-квантов сначала в однородной среде, а затем в условиях скважины были сделаны И.Г. Дядькиным (1955), Е.М. Филипповым (1955), Г.М. Воскобойниковым (1957) и др. В результате приближенного интегрирования была установлена зависимость интенсивности рассеянного гамма-излучения от плотности породы, длины зонда и характера жидкости, заполняющей скважину.

Ю.А. Гулиным в Башкирии в 1952 г. была разработана методика определения пористости по данным ГГК, а в 1954 г. проведены исследования по оценке возможностей метода ГГК для определения плотности горных пород (Гулин, 1957).

Существует много разновидностей метода ГГК для исследования как нефтяных, так и рудных скважин.

Так, в те же годы фирмой "Шлюмберже" был разработан метод ГГК скомпенсированной плотности, учитывающий наличие глинистой корки на стенках скважин. В приборе фирмы применен специальный компенсационный зонд с двумя индикаторами. На индикатор, расположенный ближе к источнику гамма-квантов, оказывают большое влияние толщина глинистой корки, непостоянство диаметра скважины и состав заполняющей жидкости. При этом величины гамма-излучений, принятые двумя индикаторами, в приборе сопоставляются между собой, автоматически вычисляются поправки на влияние глинистой корки, диаметр скважины и среду. Затем уточненная величина поступает на регистратор и записывается на диаграмме. Поскольку плотность глин близка к плотности скелета породы, действительная пористость глинистых отложений методом ГГК измеряется с достаточно большой точностью, а при измерениях с двумя зондами этим методом в большинстве случаев плотность может быть измерена непосредственно.

В Советском Союзе плотностный вариант метода ГГК для рудных скважин разрабатывался Г.М. Войкобойниковым, Л.О. Деевым (1957), А.П. Ошкуроем (1957) и другими в середине 50-х годов.

Следует упомянуть о гамма-методах, дающих возможность выделять те или иные элементы в составе горных пород. К ним относятся предложенные в 1957 г. в Советском Союзе селективный гамма-гамма каротаж (СГГК или ГГК—С) (Воскобойников, 1957) и спектрометрический селективный гамма-гамма каротаж (ССГГК) (Филипов, 1959).

При селективных методах гамма-гамма каротажа применяется источник гамма-квантов малой энергии и специальные индикаторы. При СГГК регистрируется интенсивность рассеянного гамма-излучения, в основном ее мягкая компонента, а при ССГГК измеряются и интенсивность, и энергия рассеянного гамма-излучения в области низких энергий, т.е. изучается также спектр рассеянного гамма-излучения.

В качестве источников гамма-квантов малой энергии применялись естественные изотопы Se^{75} , Cs^{137} , Hg^{203} и др. При измерениях с такими источниками преобладающее значение во взаимодействии гамма-квантов со средой будет иметь фотоэффект, который резко (в четвертой степени) возрастает при взаимодействии с более тяжелыми ядрами, т.е. увеличивается по мере увеличения атомного номера элементов.

По спектрам гамма-излучения, получаемым методом ССГГК, можно было выделить характерные минимумы, свидетельствующие о наличии соответствующего элемента в окружающей прибор породе. Для свинца, например, минимум энергии спектра гамма-квантов составлял 0,08 МэВ, а для бария — 0,03 МэВ и т.д. Таким образом, методы селективного гамма-гамма каротажа давали информацию о содержании отдельных более тяжелых элементов в составе пород, слагающих разрез скважин, и нашли широкое применение для их выявления при исследованиях рудных месторождений.

РАЗВИТИЕ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ

При исследованиях нейтронными методами специальные источники излучений, смонтированные в измерительном приборе, создают поле нейтронов. Это поле по существу и является "инструментом исследований" (Кожевников, 1974).

Процесс взаимодействия нейтронов с элементами горных пород протекает в сравнительно узком интервале времени и определяется временем замедления нейтронов в породах, диффузией нейтронов и др. Можно выделить три основных типа взаимодействия нейтронов с породами: а) упругое столкновение, в результате которого нейтрон теряет часть первоначальной энергии; б) неупругое рассеяние с испусканием гамма-квантов, при котором также теряется энергия нейтронов; в) захват нейтронов ядрами элементов пород с образованием радиоактивного изотопа. Время замедления нейтронов в результате упругого столкновения не превышает ста микросекунд, время диффузии тепловых нейтронов — нескольких миллисекунд. Процесс замедления нейтронов зависит от свойств ядер элементов, т.е. от химического состава пород (для нефтяных скважин важна и концентрация водорода); время диффузии нейтронов в породах зависит от наличия в породах элементов, ядра которых имеют

большое сечение захвата нейтронов (хлор, бор, ртуть, редкие земли). Эти процессы достаточно четко разделены во времени и, следовательно, при их регистрации можно выявить происходящие ядерные реакции.

В результате ядерных реакций энергетическое, временное и пространственное распределения нейтронов и вторичного гамма-излучения зависят от свойств элементов, входящих в состав пород и, следовательно, от химического состава горных пород. Поэтому нейтронные методы, тесно связанные с изучением элементного состава, считаются основными методами ядерной геофизики.

К настоящему времени разработано и частично внедрено большое количество нейтронных методов, каждый из которых основан на регистрации гамма-излучения на соответствующей стадии процесса взаимодействия нейтронов с горными породами. Среди существующих нейтронных методов ядерной геофизики можно выделить: нейтронные методы по тепловым и надтепловым нейтронам, нейтронный гамма-метод, группу нейтрон-нейтронных методов по тепловым и надтепловым нейтронам, метод наведенной активности и нейтронно-спектрометрические методы.

Создание большого количества нейтронных, как и других геофизических методов, вызвано необходимостью с достаточной точностью решать очень сложные задачи дистанционного определения состава пород в разрезе скважин по косвенным данным. При создании ядерно-физических методов приходилось преодолевать трудности, можно сказать, тройного порядка. Во-первых, определить физическую основу метода определения того или иного параметра пород. Трудность заключается в том, что сложный процесс взаимодействия излучений с горными породами не всегда можно точно моделировать. Во-вторых, затруднителен выбор необходимого источника излучений, который должен работать в условиях повышенных температур, давлений, агрессивной среды, а также быть малогабаритным. В-третьих, весьма трудоемкой и требующей глубоких знаний физики и геологии является разработка теории метода с учетом химически сложной неоднородной среды горных пород. Математическое описание распределения нейтронов в горных породах, необходимое для интерпретации результатов измерений (выделения того или иного элемента из общего многообразия их в составе горных пород), оказалось достаточно сложным.

Благодаря усилиям С.А. Кантора, И.Г. Дядькина, Ю.П. Булашевича, Д.А. Кожевникова, А.Л. Поляченко, Р.А. Резванова удалось установить общие закономерности процессов на основе результатов единичных экспериментов и тем самым заменить до некоторой степени непосредственные лабораторные исследования с источниками ядерных излучений теоретическими моделями на ЭВМ.

Метод нейтронного гамма-каротажа — один из первых нейтронных методов — получил достаточно широкое распространение на нефтяных промыслах Советского Союза. В начале 50-х годов он использовался для качественной оценки состава горных пород: выделения в разрезах скважин известняков, доломитов, глин, гидрохимических осадков, а на некоторых месторождениях (например, на Украине и в Ставропольском крае) пытались их применить для выделения контактов вода—нефть и газ—вода. Следует добавить, что разделение нефтеносных и водоносных пластов

долгое время не решалось нейтронными методами, поскольку показания метода НГК зависят от объемного содержания водорода и химического состава пласта на фоне помех, определяемых естественной активностью. В 1951—1952 гг. Ю.А. Гулин, работавший в тематической партии Башнефтегеофизики, впервые указал на возможность применения метода НГК для разделения нефти и воды. В то время метод НГК из-за недостаточной разрешающей способности применяемой аппаратуры не мог применяться на месторождениях со сложными геологическими условиями, характерными для Урало-Поволжья. К тому времени центр нефтедобывающей промышленности из Баку и Грозного переместился в Башкирию и частично в Татарию. Поэтому особенно актуальной являлась разработка ядерно-физических методов для исследования нефтяных скважин. В начале 50-х годов появились первые модификации нейтронных методов: нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым и надтепловым нейтронам; метод наведенной активности, положивший начало исследованиям элементного состава разреза скважин, и др.

При нейтрон-нейтронном методе по надтепловым нейтронам (ННК-нт) детектором измеряется плотность потока нейтронов этих энергий от стационарного источника нейтронов, замедленных на пути к индикатору. Конструкция прибора и выбор индикатора обеспечивают регистрацию именно надтепловых нейтронов. Это достигается тем, что индикатор окружен слоем кадмия или бора, которые поглощают тепловые нейтроны и "прозрачны" для надтепловых. Конструкция прибора рассчитана так, что на показания индикатора при оптимальном выборе расстояния между источником и индикатором оказывает влияние в основном водородосодержание замедляющей нейтроны среды. По результатам измерений плотности надтепловых нейтронов методом ННК-нт можно судить о пористости и литологическом составе пород.

Поскольку показания при методе ННК-нт определяются водородосодержанием исследуемого пласта и его химико-минералогическим составом, метод ННК-нт мог быть использован для определения объемного водородосодержания пласта, а при отсутствии в скелете породы химически связанной воды и для определения пористости и газонасыщенности.

Другой разновидностью метода нейтрон-нейтронного каротажа является метод ННК по тепловым нейтронам (ННК-т), т.е. регистрация плотности тепловых нейтронов. Так же, как и при ННК-нт, в этом методе используется прибор, в котором индикатор и источник расположены на строго рассчитанном расстоянии друг от друга. Если при методе ННК-нт решающее значение имеет замедляющая способность пластов, то при ННК-т на показания индикатора существенное влияние оказывают еще и время жизни нейтронов и диффузионные качества породы.

Недостатком методов ННК-нт и ННК-т является чувствительность индикатора к влиянию ближней зоны (конструкции скважины, характеру заполняющей ее жидкости и т.п.). Позднее при разработке более полной теории происходящего процесса и совершенствовании аппаратуры по результатам нейтронных методов — ННК-т и НГК — стало возможным ориентировочно оценивать пористость, а если пористость известна по кернам, по данным ННК-т можно вычислять коэффициент газонасыщенности коллекторов.

Одним из направлений при решении задачи разделения нефтеносных и водоносных пластов в разрезе скважин было использование спектрометрических методов. Известные к началу 50-х годов ядерно-физические методы не давали однозначного ответа на поставленный вопрос: вода или нефть находится в пластах, поскольку нейтронные свойства и величина естественной радиоактивности нефти и воды мало отличаются друг от друга. Применявшиеся методы сводились или к количественному определению водородосодержания, или к установлению различий в содержании солей в нефти и пластовой воде, иногда — фазовой проницаемости нефтеносной и водоносной частей пластов по отношению к различным жидкостям (Дахнов, 1957).

В конце 40-х годов А.А. Коржевым был предложен метод наведенной активности — один из первых спектрометрических методов исследования скважин. Он основан на активации потоком нейтронов горных пород и пластовых вод. При этом может быть обнаружено наличие натрия, хлора и других элементов, входящих в больших количествах в состав подземных вод и в малых — в нефтеносные пески. Этот метод разрабатывался как модификация нейтронных методов, но вскоре на его основе было создано особое направление спектрометрии скважин, дающее возможность проведения элементного анализа состава горных пород. В дальнейшем в области спектрометрии скважин были разработаны методы, основанные на различных реакциях пород с нейтронами (радиационного захвата, неупругого рассеяния и др.).

Разработка метода нейтронной активации горных пород по Na и Cl проводилась в Институте нефти АН СССР в 1952–1954 гг. под руководством Г.Н. Флерова, Б.Б. Лапука и Ф.А. Алексеева дипломником Московского инженерно-физического института Ю.С. Шимилевичем и научными сотрудниками Д.Ф. Беспаловым, Г.Р. Гольбеком, Б.Г. Ерозолимским, Н.К. Кухаренко, В.П. Одиноким (Флеров, Алексеев, 1955).

В основу этого нового метода были положены принципы активационного анализа, широко применявшегося в то время для определения химического (элементного) состава вещества по периоду полураспада и энергии излучения активированных элементов. В процессе облучения горных пород нейтронами также происходит захват последних ядрами элементов, входящих в состав пород, в результате чего образуются соответствующие изотопы с определенным периодом полураспада и энергией гамма-излучения. Измерение этих показателей дает возможность выявить наличие радиоактивных изотопов конкретных элементов пород и определить их количество.

Поскольку метод наведенной активности начал разрабатываться для исследования нефтяных месторождений, основной задачей было получение данных для более уверенного выделения в толще пород нефтеносных пластов и отличия их от водоносных по поведению индикаторного элемента, выбор которого связан с определенными условиями. Прежде всего следовало иметь в виду, что количество изотопа индикаторного элемента должно было резко отличаться в нефтеносном и водоносном

пластах, а в ближней зоне (скважина, колонна, цементное кольцо) этот элемент должен находиться в незначительных количествах, иметь достаточно большое сечение активации и при распаде испускать гамма-кванты. Желательно, чтобы период полураспада индикаторного элемента для более уверенного его выделения из общего фона излучений значительно отличался от периода полураспада других возникающих в процессе облучения элементов. Но поскольку период полураспада изотопа того или иного элемента горных пород определялся по времени, прошедшему с конца облучения и до начала измерений, время жизни возникших изотопов индикаторного элемента не должно превышать нескольких часов, чтобы не задерживать надолго остановку бурения скважины. Время измерений выбиралось с таким расчетом, чтобы гамма-излучение этого изотопа в процессе измерений было максимальным.

Набор элементов горных пород оказался не таким обширным для выбора индикаторного элемента. В сопутствующих горных породах наиболее часто встречаются хлор, натрий, марганец, магний, алюминий и другие. Прежде всего была проанализирована возможность использования основных элементов, входящих в состав нефти и воды. Однако изотопы углерода, водорода, кислорода не давали гамма-излучений при распаде, а сечение активации кислорода O^{16} к тому же чрезвычайно мало.

В первых исследованиях методом наведенной активности медленными нейтронами, разработанным в Институте нефти АН СССР, в качестве индикаторного элемента был выбран натрий, обычно содержащийся в больших концентрациях в пластовых водах и в малых — в нефтеносных пластах. Например, в водоносных пластах девонских платформенных месторождений натрий содержится в количестве около $0,01 \text{ г/см}^3$ породы, а в нефтеносных — почти в 7–9 раз меньше, в зависимости от нефтенасыщенности пласта. В нефтеносной части пласта связанная и пластовая вода характеризуются примерно одним и тем же содержанием солей, в том числе натрия. В ближней зоне — цементном кольце и стволе скважины — содержание натрия крайне незначительно. Кроме того, излучение долгоживущего изотопа натрия составляет наибольшую долю в излучении породы через несколько часов после облучения, когда изотопы алюминия, хлора и марганца почти полностью распадаются.

В 1954–1955 гг. метод наведенной активности медленными нейтронами был опробован в скважинах на нефтяных месторождениях Жирновском в Волгоградской области, Бавлы и Ромашкино в Татарской АССР, Туймазы в Башкирии. В качестве индикаторных элементов были избраны натрий и марганец. Успешная разработка и опробование на нефтяных промыслах метода наведенной активности в довольно короткие сроки стали возможны благодаря появлению новой радиометрической аппаратуры со сцинтилляционными счетчиками, позволяющими использовать энергетический спектр гамма-излучения в больших пределах. В опробовании нового метода принимали активное участие не только научные сотрудники Института нефти АН СССР, но и ВНИИГеофизики (С.А. Кантор, Н.И. Сазонов), а также тематические партии по внедрению методов радиоактивного каротажа (Е.Б. Бланков, И.Л. Дворкин, Л.З. Цлав, С.М. Аксельрод, В.П. Иванкин).

Как и ожидалось, наибольшее различие величины наведенной активности натрия наблюдалось против водоносных и нефтеносных пластов. Особенно показательны были измерения на Жирновском месторождении, где гамма-излучение против водоносных пластов было почти в два раза больше, чем против нефтеносных. Результаты применения метода наведенной активности по натрию для разделения нефтеносных и водоносных пластов в нескольких десятках скважин показали промысловым геологам его перспективы при исследованиях нефтяных пластов с минерализованной подошвенной и законтурной водой. Метод был пригоден также и для скважин с относительно невысокой минерализацией пластовых вод, поскольку разрешающая способность его весьма велика.

Однако для широкого применения скважинной спектрометрии и метода наведенной активности требовалась специальная, весьма сложная аппаратура. К тому времени в физических лабораториях стали применять люминесцентные спектрометры. Создание подобных скважинных приборов являлось сложной технической задачей, с которой в короткие сроки успешно справились Б.Г. Ерозолимский и Д.Ф. Беспалов. Начиная с 1953 г. при исследованиях в скважинах начали применяться сцинтилляционные спектрометры, которые использовались и при методе наведенной активности.

Основы другого метода для селективного выявления хлора заложены Г.Р. Гольбеком и Ю.С. Шимилевичем в 1951–1952 гг. Были разработаны два типа спектрометрической аппаратуры: со схемой совпадения на счетчиках Гейгера–Мюллера (Г.Р. Гольбек) и со сцинтилляционными счетчиками (Б.Г. Ерозолимский и Д.Ф. Беспалов). Испытания метода проводились в Башкирии в 1952–1953 гг. В тресте Туймазанефть по указанию П.П. Галонского и Т.М. Золоева в 1952 г. впервые был применен комплекс нейтронных методов ННК–НГК для определения водонефтяного контакта в нефтяных скважинах. Идея комплекса заключалась в том, что в зоне контакта против водоносных пластов должно наблюдаться уменьшение показаний ННК из-за большого сечения захвата нейтронов ядрами хлора и в то же время должны увеличиваться показания НГК в связи с излучением хлором нескольких гамма-квантов при захвате одного нейтрона. Это направление работ развивалось А.И. Холиным, В.Н. Дахновым, Б.М. Орлинским, И.Л. Дворкиным, А.Ш. Галяевым и др.

Разработкой различных модификаций метода наведенной активности по различным элементам стали заниматься в последующие годы во ВНИИ Геофизике и тематических партиях на промыслах. В 1955–1956 гг. во ВНИИ Геофизике был разработан специальный люминесцентный гамма-спектрометр с высокой разрешающей способностью (Кантор и др., 1957). Были проведены опыты по определению состава пород по гамма-спектрам наведенной активности. На полученных первых диаграммах удалось выделить две близко расположенные линии спектра гамма-излучения изотопа кобальта ($_{27}\text{Co}^{60}$) с энергиями 1,17 и 1,38 МэВ. Вскоре партией Татнефтегеофизики была показана возможность выделения характерной линии спектра гамма-излучения марганца и высказано предположение определять водонефтяной контакт по "обратному" эффекту наведенной активности марганца для скважин, в которых начался процесс осолонения затрубного цемента.

В середине 50-х годов начались экспериментальные работы по применению нейтронов для активации ядер различных элементов в рудной геофизике. Опыты на моделях рудных пластов показали, что ядерные реакции при облучении быстрыми нейтронами горных пород дают возможность исследовать содержание достаточно широкого круга элементов, в том числе кремния, железа и менее распространенных элементов. Помимо опытов проводились и необходимые теоретические расчеты. Так, К.И. Якубсон разработал метод расчета пространственно-энергетического распределения быстрых нейтронов в средах различного химического состава. Им было теоретически показано, что плотность нейтронов, не испытавших рассеивающих столкновений, убывает с ростом железистости пород на любых расстояниях от источника нейтронов.

В дальнейшем в качестве индикаторных использовались различные элементы и ядерные реакции. В результате разработки метода наведенной активности и развития скважинной спектрометрии при исследованиях горных пород в естественном залегании впервые стало возможным с земной поверхности определять входящие в состав погребенных пород элементы непосредственно в скважинах, сначала нефтяных, а с 60-х годов и рудных. Это направление явилось одним из наиболее эффективных в исследованиях элементного состава горных пород и руд.

Проводимые в 50-х годах в лабораториях Московского нефтяного института, ВНИИГеофизики и Института нефти АН СССР многолетние исследования вещественного состава пород ядерно-физическими методами обеспечили теоретические основы разработки основных методов этого направления, которые затем развивались совместно с ВНИИЯГГом. Были изучены спектры гамма-излучения, возбужденного нейтронами ядер породообразующих элементов, которые являются их специфической ядерно-физической характеристикой и могут быть использованы для определения вещественного состава пород в разрезе скважин (Холин, 1969).

Сущность явлений, происходящих при исследованиях спектрометрическими методами, может быть сведена к трем процессам: неупругому рассеянию быстрых нейтронов, радиационному захвату и распаду активированных ядер.

В спектрометрических методах, основанных на регистрации гамма-излучения радиационного захвата, получаемые результаты отражают зависимость гамма-излучения от радиационных свойств элементов, ядра которых поглотили нейтроны. По энергии гамма-излучения определяется наличие того или иного элемента в составе пород, а по интенсивности излучения — его концентрация. Так, элементы с большим сечением захвата излучают гамма-кванты высоких энергий, которые регистрируются с помощью сцинтилляционных счетчиков. К таким элементам относятся: хлор (энергия излучения 7,77–7,42 МэВ), алюминий (7,72–3,02 МэВ), магний (8,16–3,92 МэВ), кальций (6,42–5,89 МэВ), кремний (6,40–4,95 МэВ) (Дебранд, 1972).

Одним из методов, основанных на реакции радиационного захвата нейтронов, является метод нейтронного гамма-гамма каротажа (НГГК), предложенный в СССР В.П. Иванкиным (1957).

С его помощью регистрируется многократно рассеянное излучение радиационного захвата в интервале энергий 0,2—0,3 МэВ. При облучении потоком нейтронов горных пород в скважинах тепловые нейтроны поглощаются ядрами породобразующих элементов, которые становятся источниками первичного гамма-излучения. Не вдаваясь в подробности описания метода, можно сказать, что возможна регистрация и более малых энергий порядка 0,05—0,15 МэВ.

Разрабатывались и методики количественной интерпретации результатов метода захватного гамма-излучения. Но в связи с созданием импульсных методов количественного определения содержания элементов и успешным внедрением их в нефтяную промышленность метод НГГК стал применяться главным образом при исследованиях элементного состава бурных скважин.

Другой спектрометрический метод исследования скважин основан на регистрации неупругого рассеяния нейтронов. Он был разработан в СССР Н.В. Поповым, Ю.С. Шимилевичем при участии Б.Г. Ерозолимского. В отличие от методов наведенной активности и радиационного захвата здесь вместо изотопных источников стал применяться генератор нейтронов в импульсном режиме. Физическая картина процесса в общем виде сводится к тому, что поток быстрых нейтронов от источника излучений, вступая во взаимодействие с ядрами элементов горных пород, испытывает неупругое столкновение с ядрами некоторых элементов. Измеряя сцинтилляционными счетчиками спектр возникшего гамма-излучения, можно непосредственно обнаружить в породах содержание таких элементов, как углерод, кремний и другие.

Спектрометрические и активационные методы изучения горных пород в лабораториях и в естественном залегании нашли широкое применение в рудной промышленности для выявления в породах железа, алюминия, магния и других элементов. В нефтяной промышленности результаты спектрометрии скважин давали возможность получить новые дополнительные данные, которые в общем комплексе геофизических исследований помогали при определении пористости и других физико-химических параметров продуктивных пластов в процессе бурения без отбора и поднятия на поверхность образцов.

ИСЧЕРПАЕМОСТЬ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

В середине 50-х годов были выявлены и доказаны на практике большие принципиальные возможности использования ядерно-физических методов исследования нефтяных скважин для выявления продуктивных нефтеносных пластов и определения состава горных пород.

Разнообразие применяемых в то время методов было показателем популярности и перспективности нового направления, с одной стороны, и показателем их некоторой слабости, с другой. По существу разработка каждого нового метода была вызвана невозможностью однозначно решать поставленные геологические задачи техническими средствами того време-

ни. Принимаемые за основу того или иного метода модели физического процесса и попытки теоретического описания отдельных его сторон постепенно приближали исследователей к познанию реальных процессов, происходящих в горных породах при их облучении.

Описанные выше ядерно-физические методы, базирующиеся на различии в содержании поглотителей и замедлителей нейтронов, например хлора в нефти и пластовой воде, не отличались высокой эффективностью, хотя каждый из них еще и еще раз подтверждает большие потенциальные возможности ядерно-физического направления исследований.

Анализ факторов, влияющих на эффективность ядерно-физических исследований нефтяных скважин, показал, что необходимо принципиальное изменение подхода к моделированию физического процесса в породах, его теоретическое описание и измерение основных параметров. Имевшаяся аппаратура с изотопными источниками излучений обладала недостаточной разрешающей способностью. Применяемые $Po + Be$ и $Ra + Be$ источники давали поток нейтронов с энергией, не превышающей 10–11 МэВ. Результаты сильно зависели от условий измерений и качества отдельных узлов аппаратуры, но, несмотря на это, применение радиоактивного каротажа уже в то время давало существенный экономический эффект.

Однако требования к новому направлению по мере подтверждения его принципиальной перспективности также повышались. В связи с этим постепенно повышалась интенсивность применяемых источников радиоактивных излучений, требовалось соблюдение специальных мер по технике безопасности при их использовании на скважинах, хранении и транспортировке. Как видно, на этом этапе развития ядерная геофизика переживала некое кризисное положение, когда уровень развития технических средств задерживал дальнейшее развитие практических приложений достижений науки. Кроме того, проведенные лабораторные исследования показали невозможность реализации установленных оптимальных соотношений между размерами зонда, чувствительностью детектора и мощностью источника излучений при использовании изотопных источников. Поиски таких новых типов скважинных источников излучений достаточно большой мощности, которые не увеличивали бы опасности работы с ними, в конце концов привели к идее создания управляемых источников излучений.

В зарубежной печати в середине 50-х годов стали появляться первые короткие публикации в основном рекламного характера о разработке управляемых источников излучений, а также о проведении геофизическими фирмами исследований в этой области (McCullough, develops. . . , 1955).

Одновременно подобные исследования начались и в Советском Союзе. Разработка достаточно мощных генераторов нейтронов малых размеров оказалась сложной технической задачей. Дело в том, что ускоритель высоких энергий 10–14 МэВ должен помещаться в трубу диаметром не более 100 мм, длиной не более 2–4 м и работать в условиях агрессивной среды (нефть, соленая пластовая вода), высоких давлений (сотни атмосфер) и высоких температур (60–150°C).

Разработка генератора нейтронов и предварительные исследования проводились Институтом нефти АН СССР и ВНИИ Геофизикой под руководством Г.Н. Флерова и Ф.А. Алексеева. Самые трудные первые исследования и разработки провели сотрудники указанных институтов Д.Ф. Беспалов, Б.Г. Ерозолимский, Г.Р. Гольбек, Н.В. Попов, Р.А. Резванов, Д.М. Сребродольский, Ю.С. Шимилевич, А.С. Школьников и др. Для решения отдельных задач и проведения некоторых специфических исследований были привлечены специализированные физические и приборостроительные организации, а также высшие учебные заведения, в том числе Московский нефтяной и Ленинградский электротехнический институты.

В процессе разработки управляемого источника излучений Г.Н. Флеровым в 1955 г. была выдвинута идея создания импульсного прибора, позволяющего изучать распределение поля нейтронов не только в пространстве, но и во времени (Алексеев и др., 1956).

Научная школа Г.Н. Флерова, которой был разработан метод наведенной активности, обсуждала вопросы, связанные с использованием этого метода для различения пластов по водо- и нефтенасыщенности. Необходим был источник нейтронов интенсивностью более 10^9 н/с. Но мощный источник уже требовал специальных мер защиты обслуживающего персонала. Была рассмотрена возможность создания управляемого источника, который можно было бы опускать в скважину и только тогда включать с поверхности Земли. Источником подобного типа являлся ускоритель нейтронов с тритием. Можно было, как тогда обсуждалось, не только создать управляемый источник, но и сделать его пульсирующим, импульсным. Такой источник мог создать техническую основу для изучения нестационарных процессов диффузии нейтронов в горных породах.

Импульсный нейтронный метод исследования скважин оказался самым эффективным ядерно-физическим методом. Он подробно будет рассмотрен в следующей главе.

РАЗРАБОТКА ПЕРВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОДВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВОГО ПОДХОДА
К ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ

Использование управляемых источников излучения нейтронов — генераторов нейтронов — дало на первом этапе их применения некоторые преимущества по сравнению с ампульными. Прежде всего обеспечивалась большая безопасность работы, поскольку источник нейтронов существовал только в момент включения с земной поверхности, когда прибор находился в скважине. Повысить же эффективность нейтронных методов с помощью генераторов нейтронов, создающих стационарное поле, не удавалось. Несмотря на повышение энергии излучения, не было существенно снижено даже влияние ближней зоны.

Более того, немногочисленные теоретические работы того времени (Гулин, 1958; Иванкин, 1965; Кантор, 1955; Федынский, Комаров, 1956; и др.) и обсуждения создавшегося положения на всесоюзных конференциях доказали невозможность однозначной трактовки результатов измерений. Было показано, что поля тепловых нейтронов и вторичного гамма-излучения являются сложной функцией многих, не всегда известных нам процессов, протекающих в условиях реальной скважины, и многообразия сочетаний в ней горных пород.

В то же время было ясно, что только ядерно-физические методы могут обеспечить возможность изучения элементного состава, а следовательно, и литологии горных пород на больших глубинах. Снова, как и в 20-х годах, выявилась необходимость в фундаментальных физических исследованиях поведения нейтронов в различных средах. Уровень науки и техники начала 50-х годов обеспечивал проведение подобных экспериментов, а практическое приложение фундаментальных исследований в области ядерной физики стимулировало проведение подобных исследований в физических институтах.

В Физическом институте им. Лебедева и в Радиовом институте свойства и поведение нейтронов исследовались не только на основе анализа энергии и интенсивности излучений, но и по времени их возникновения в средах относительно момента испускания начальных нейтронов источником излучений (Антонов и др., 1958). Новые приемы исследования дали возможность выделить многие ядерные реакции при замедлении быстрых и диффузии медленных нейтронов, протекающие в разное время.

Так, было показано, что неупругое рассеяние продолжается от 10^{-9} до 10^{-8} с после испускания источником быстрых нейтронов; резонансное поглощение медленных нейтронов протекает от 10^{-6} до 10^{-4} с; диффузия тепловых нейтронов — от 10^{-4} до 10^{-2} с, а распад активированных ядер еще медленнее. Таким образом, если было бы возможно осуществить отдельную регистрацию указанных ядерных взаимодействий, то по результатам измерений можно было бы судить о различных ядерных свойствах вещества. Физиками был разработан также лабораторный импульсный нейтронный метод изучения диффузионных нейтронных параметров однородных ограниченных сред, основанный на использовании нестационарного поля тепловых нейтронов. Новое направление исследований нейтронов начали проводить в 1952—1954 гг. в Советском Союзе И.М. Франк, Ф.Л. Шапиро, М.В. Казарновский, А.В. Антонов, А.И. Исаков и др., а за рубежом — Дж. Дарделл, М. Сьестранд (Dardell, 1954, Dardell, Sjostrand, 1954).

Как указывал Г.Н. Флеров в 1956 г., возможность оценки среднего времени жизни тепловых нейтронов, в частности, открывала перспективы определения нефтенасыщенности пластов и содержания в породах полезных ископаемых. Были основания надеяться также на то, что при регистрации во времени процесса диффузии тепловых нейтронов можно найти пути для уменьшения влияния помех, вносимых скважиной и ближней зоной. Это, как предполагал Г.Н. Флеров, возможно в случае, когда поглощение нейтронов в скважине будет происходить интенсивнее, чем в пласте, и когда их плотность вблизи измерительного прибора будет определяться только диффузионным потоком из пласта. Кроме того, применение временного анализа излучений должно было явиться перспективным для изучения периодов полураспада активированных изотопов, характера затухания полей надтепловых нейтронов и т.п. Предположения Г.Н. Флерова базировались не только на результатах работ физиков, имелись некоторые данные разработки временного анализа и в нефтяной геофизике. При разработке метода наведенной активности в Специальной лаборатории Московского нефтяного института Ю.С. Шимилевич в 1952 г. ввел временной анализ для освобождения полученных данных от влияния фона неупругого рассеяния и радиационного захвата ядер с тем, чтобы было возможно провести выборочную регистрацию искомого активированного изотопа (натрия, хлора и др.). Это и определило практическую пригодность метода активации.

При разработке метода наведенной активности были исследованы зависимости времени облучения от интенсивности вызванного излучения, использовано различие в энергии гамма-излучения распада различных радиоактивных элементов, изучено значение интервала времени между окончанием облучения и началом измерения наведенной активности и т.д.

На основе схемы излучения диффузионных нейтронных параметров однородных ограниченных сред, проведенного в физических лабораториях, и использования накопленных в нефтяной промышленности данных по методу наведенной активности в СССР в 1956 г. Г.Н. Флеровым была предложена общая идея нового импульсного нейтронного метода. При 120

ее обсуждении с Б.Г. Ерозолиским выяснилось, что импульсный вариант может дать возможность увеличивать (теоретически неограниченно) и глубину исследований и различие показаний прибора против нефти и водонасыщенных пластов, поскольку зависимость интенсивности нейтронов от времени имеет экспоненциальный характер. Проверка физической сущности нового метода была проведена на нейтронных генераторах ФИАНА по разрешению и при поддержке И.М. Франка и Ф.Л. Шапиро (Ерозолимский и др., 1960). В зависимости от выбранного метода могут осуществляться два вида регистрации: по интенсивности тепловых нейтронов (ИННК) или по интенсивности гамма-квантов, возникающих при захвате нейтронов ядрами элементов пород (ИНГК).

Процесс распространения нейтронов в среде носит диффузионный характер, причем значение коэффициента диффузии тепловых нейтронов D , от которого зависит скорость распространения, связано с наличием в среде ядер, сильно рассеивающих нейтроны, прежде всего водорода (Ерозолимский, Войчик и др., 1958).

В общем случае число регистрируемых нейтронов n в зависимости от времени жизни тепловых нейтронов t может быть представлено согласно теории диффузии (Соболев, 1954) как функция

$$n(t, z) = A \exp \left[-\frac{t}{\tau} - \frac{z^2}{4(\Lambda - D t)} \right],$$

где D — коэффициент диффузии нейтронов в среде; τ — среднее время жизни тепловых нейтронов; z — расстояние от источника до детектора; Λ — коэффициент, зависящий только от свойств окружающей среды; A — коэффициент.

Из экспоненциального характера зависимости плотности тепловых нейтронов следует, что, регистрируя через определенные интервалы времени t_1, t_2 против пластов разного состава (а следовательно, и различного τ), можно выявить со сколько угодно большой точностью различие в величинах τ_1 и τ_2 . Причем величина отношения $n(t_1, \tau_1)/n(t_2, \tau_2)$ ограничивается только техническими возможностями аппаратуры (величиной выхода нейтронного источника, качеством детектора и т.п.) (Шимилевич, Школьников, 1962).

Позднее были уточнены факторы, влияющие на процесс взаимодействия нейтронов с горными породами, и введены следующие параметры, связанные с составом горных пород. Помимо коэффициента диффузии D и среднего времени жизни нейтронов τ были введены понятия длины и времени замедления быстрых нейтронов в пласте L_3 и t_3 .

Для целей геофизических исследований нефтяных месторождений особенно важны измеряемые или вычисляемые на основе измерений L_3 , t_3 , τ и D . Была установлена их зависимость от химического состава горных пород, структурного размещения компонентов, коллекторских свойств пластов, характера насыщающей пласт жидкости (вода или нефть). Оказалось, что, начиная с определенного содержания в пласте водорода, длина замедления быстрых нейтронов L_3 и коэффициент диффузии пласта D зависят от его концентрации в пласте, время жизни тепловых нейтронов

τ — от объемного содержания хлора, бора, ртути. Таким образом, удалось связать некоторые ядерные величины с составом горных пород. Величины L_3 , t_3 , D и τ получили название нейтронных параметров горных пород, их определение дает достаточно исчерпывающую характеристику породы и в отношении нефтегазонасыщенности продуктивных и водоносных пластов. Понятие "нейтронные параметры пород" в последнее десятилетие широко применяется во всей научной и технической литературе.

УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ СОСТАВА И КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТОВ С ИХ НЕЙТРОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Для исследования нефтяных месторождений важно знать не общее водородосодержание, а получить ответ на вопрос — нефть или вода в порах пласта, поэтому наибольшее внимание уделялось и уделяется методам, помогающим получить достоверные сведения о качестве жидкости, насыщающей исследуемый пласт, а также изучению количественных показателей пористости и водородонасыщенности пластов.

Поскольку сечение рассеяния быстрых нейтронов на ядрах водорода аномально велико, а среднее время замедления нейтронов t_3 в значительной степени зависит от концентрации водорода в пластах, можно считать, что время замедления нейтронов определяется величиной коэффициента пористости горных пород $k_{\text{п}}$. Среднее время замедления нейтронов в породах зависит от каркаса пласта и водородосодержания (Кожевников, 1959). От каркаса пород и содержания в нем элементов с большим сечением захвата зависит и величина среднего времени жизни тепловых нейтронов τ . Особенно большое влияние на τ оказывает содержание бора, а также калия, натрия, титана, марганца, серы, свинца, железа. Суммарный вклад присутствия этих элементов в породах в уменьшение среднего времени жизни нейтронов может достигать 50% (Авдеева и др., 1969). На основании проведенных измерений нейтронных характеристик можно в первом приближении определить физические параметры породы.

Так, соотношение алюминия, входящего в состав всех глинистых минералов, и кремния — основного породообразующего элемента осадочных пород — дает основание судить о глинистости (Кожевников, 1974). Первые расчеты среднего времени жизни нейтронов в породах с различным соотношением между алюминием и кремнием применительно к нейтронному каротажу проведены А.С. Школьниковым и Д.М.Сребродольским с сотрудниками. Глинам соответствует меньшее отношение Al/Si , алевролитам и песчаным породам — значительно большее. При этом у пород, содержащих глинистый материал, время жизни нейтронов в минеральном скелете породы меньше, чем у чистых разностей, и тем меньше, чем больше глинистых материалов в них содержится. Повышенное содержание серы в карбонатных породах уменьшает время жизни нейтронов, а магния — увеличивает его. Самое минимальное время жизни нейтронов отмечено в породах, сложенных ангидритами, гипсами и глинистыми мине-

ралами. Химический состав породообразующих минералов оказывает непосредственное влияние на время жизни нейтронов и косвенное на петрофизические качества породы, в частности на пористость. Повышенное содержание серы в скелете породы, как правило, влечет за собой последующее увеличение отложений серы в пустотах (трещинах, кавернах, каналах) и тем самым уменьшает количество находившихся в них флюидов. Зависимость величины среднего времени жизни нейтронов не только от химического состава, но и от пространственного распределения элементов, поглощающих нейтроны, была выявлена работами Ю.П. Булашевича и С.А. Кантора. Позднее В.Ф. Захарченко (1961), а также С.А. Кантор рассчитали размеры "зерен" и прослоев различных элементов, начиная с которых эффект самоэкранирования становится весьма существенным. Согласно измерениям В.В. Миллера (1966), увеличивается на 30% по сравнению с однородной средой среднее время жизни нейтронов из-за наличия в породах зерен минералов и пор в коллекторах.

Влияние состава породообразующих элементов на энергетический состав гамма-излучения, возникающего под действием нейтронов прибора, связано с реакциями $(n, n' \gamma)$, (n, γ) и активизацией этих элементов, а также с излучаемой ими энергией гамма-квантов. На малых расстояниях от источника энергетическое распределение нейтронов близко к таковому в случае равномерно распределенным источником, а в случае локализованного источника происходит пространственное изменение спектра. Кроме того, следует учитывать, что при простой форме энергетического спектра нейтронов от источника излучений резонансная структура сечений элементов замедляющей среды проявляется достаточно ясно.

Как видно, спектральный состав излучения, фиксируемый детектором в приборе импульсного нейтронного каротажа, являющийся достаточно сложным, еще более усложняется в процессе взаимодействия нейтронов стогрными породами, гильзой прибора и т.п. Работами К.И. Якубсона и Г.А. Недоступа была показана возможность и целесообразность раздельной регистрации излучений, возникающих в результате указанных выше реакций.

В исследованиях Д.А. Кожевникова (Кожевников, Хавкин, 1970; Кожевников и др., 1971) и И.Г. Дядькина (Дядькин, Баталина, 1961) в энергетически-временном распределении нейтронов в случае импульсного источника отмечены независимость спектра от начальной энергии нейтронов и влияние на его форму и энергию в основном параметров взаимодействия нейтронов со средой при фиксированной конечной энергии излучений.

Н.В. Поповым и Ю.С. Шимилевичем (Шимилевич и др., 1968) на основании сравнения макроскопических сечений показано участие значительной доли испускаемых источником нейтронов в реакции неупругого рассеяния $(n, n' \gamma)$. Предполагалось, что при упругом взаимодействии (n, γ) нейтронов с ядрами некоторых элементов, таких, как кремний, углерод и кислород, потеря энергии нейтронами невелика. На моделях было показано, что при начальной энергии нейтронов 14 МэВ в сухом песчанике неупругое рассеяние испытывает практически каждый испускаемый источником нейтрон. Так, в песчанике пористостью 20% в неупругое столк-

новение после трех соударений вступает 85% нейтронов, а в воде только 30–40%.

Поскольку только в реакциях с быстрыми нейтронами проявляются индивидуальные свойства многих элементов (например, углерода, кислорода, магния и др.), при разработке и дальнейшем усовершенствовании импульсных нейтронных методов большое внимание уделялось выбору времени регистрации гамма-квантов неупругого рассеяния. Связь между средним временем жизни тепловых нейтронов в горных породах и пористостью можно объяснить тем, что изменение пористости пород приводит к изменению объема скелета и объемного содержания флюидов, а это в конечном счете ведет к изменению среднего времени жизни тепловых нейтронов в исследуемой среде (Буров и др., 1969).

Для равномерно распределенных флюидов (обозначения с индексом фл) в скелете (ск) породы была выведена простейшая формула

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1 - k_{\pi}}{\tau_{\text{ск}}} + \frac{k_{\pi}}{\tau_{\text{фл}}} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\tau} = A + B k_{\pi},$$

где

$$A = \frac{1}{\tau_{\text{ск}}}, \quad B = \frac{1}{\tau_{\text{фл}}} - \frac{1}{\tau_{\text{ск}}}.$$

Исследования параметра B показали, что эта величина изменяется пропорционально минерализации пластовых вод, т.е. при уменьшении минерализации увеличивается время жизни нейтронов в жидкости; за счет примесей в каркасе породы коллектора (наличие железа, глины, марганца, бора и др.) время жизни нейтронов в скелете уменьшается. Как видно, для первой прикидки пористость пластов можно определять непосредственно по полученным значениям времени жизни тепловых нейтронов.

Пористость пород можно также оценивать по другому нейтронному параметру — коэффициенту диффузии нейтронов D . Поскольку вода и нефть содержат почти одинаковое количество ядер водорода, величины коэффициентов диффузии для воды и нефти близки. Для определения пористости по величине D была выведена формула, аналогичная предыдущей:

$$\frac{1}{D} = \frac{1 - k_{\pi}}{D_{\text{ск}}} - \frac{k_{\pi}}{D_{\text{фл}}} \quad \text{или} \quad \frac{1}{D} = \bar{A} - B k_{\pi},$$

где

$$\bar{A} = \frac{1}{D_{\text{ск}}}, \quad B = \frac{1}{D_{\text{фл}}} - \frac{1}{D_{\text{ск}}}.$$

Как видно, по измерениям методами импульсного нейтронного каротажа можно определить непосредственно пористость горных пород, насыщенных нефтью или водой.

На первых этапах развития импульсных нейтронных методов Д.М. Сребродольским была установлена принципиальная возможность непосредственного определения также важнейшего параметра нефтеносности место-

рождений — коэффициента нефтенасыщенности k_H продуктивных пластов

$$k_H = f(\tau) \text{ или } k_H = \frac{\frac{1}{\tau_B} - \frac{1}{\tau_{СК}} - \frac{1}{k_H} \left(\frac{1}{\tau_{НП}} - \frac{1}{\tau_{СК}} \right)}{\frac{1}{\tau_B} - \frac{1}{\tau_H}}.$$

Если в процессе измерений будет известно среднее время жизни тепловых нейтронов в скелете породы, пластовой воде, нефти и соответствующие коэффициенты, то можно вычислить и коэффициент нефтенасыщенности продуктивного пласта.

В результате экспериментального и теоретического изучения закономерностей распределения нейтронов в горных породах и зависимости полученных данных от их состава и свойств были определены некоторые нейтронные характеристики горных пород.

При их расчетах учитывались положения теории переноса нейтронов в веществе, геохимические, петрофизические и структурные особенности горных пород, а также термодинамические условия их залегания в условиях нефтяных скважин или рудных тел. Поэтому одним из первых аспектов разработки нейтронных методов исследования нефтяных месторождений и было изучение нейтронных характеристик горных пород и теоретического распределения в них нейтронов и гамма-квантов с целью предварительного обоснования способов измерений и принципов интерпретации результатов. Следующим важным шагом была разработка измерительной аппаратуры и изучение закономерностей распределения нейтронов и гамма-квантов в реальных горных породах при реальных скважинных условиях после предварительного моделирования.

СОЗДАНИЕ ПЕРВЫХ СКВАЖИННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЙ

В начале 50-х годов в промысловой геофизике наметилась тенденция все более резкого увеличения мощности используемого источника излучений. Стали широко применяться полониево-берриллиевые изотопные источники с выходом нейтронов до 10^{7-8} н/с, работа с которыми уже могла представлять серьезную опасность для персонала.

Нужно было создать новый тип источника, который мог бы включаться только в момент измерений в скважине. Первые сообщения о возможности получения мощных излучений нейтронов в приборах с дистанционным управлением появились в зарубежной печати в 1954—1955 гг. Американские технические журналы в коротких рекламных статьях предлагали для исследования скважин устройства, в которых генерируются нейтроны. Позднее устройства подобного типа получили название нейтронных трубок, поскольку давали результирующее нейтронное излучение.

Разработка ускорительных трубок проводилась в те же годы в СССР, но в отличие от американских они предназначались для работы не только

в стационарном, но и в импульсном режиме. Приоритет Советского Союза в создании импульсных нейтронных методов — нового направления ядерно-физических исследований сначала нефтяных, а позднее рудных месторождений многих полезных ископаемых признается ведущими специалистами в этой области во всех странах. Уже на первом этапе, минуя стадию механической замены изотопного ампульного источника, советские специалисты с привлечением ученых-физиков начали разработку макета прибора, скважинного источника излучений, систем индикации и регистрации излучений горных пород, вызванных источником прибора.

Один из первых скважинных приборов состоял из ускорительной ионной трубки, индикатора нейтронов или гамма-лучей, схемы селекции излучений по энергиям, схемы записи, генератора управляющих импульсов, схемы управления работой генератора, мишени (Ерозолимский и др., 1958).

По предложению Б.Г. Ерозолимского простейшая конфигурация трехэлектродной газонаполненной нейтронной трубки была использована одновременно и как высоковольтный кенотрон для удвоения ускоряющего напряжения. Это позволило в короткие сроки решить чрезвычайно трудную для того времени задачу размещения высоковольтного трансформатора в малых габаритах скважинного прибора.

Ускорительная трубка включается дистанционно с поверхности Земли при помощи времязадающего импульсного устройства, которое одновременно регулирует момент записи потока нейтронов или гамма-квантов. В цикл измерений входят: время, в течение которого мишень ускорителя испускает поток нейтронов определенной энергии; время ожидания, или задержки, и время регистрации импульсов от индикаторов. Такие циклы повторяются с заданной частотой. При изменении времени задержки можно получить достаточно полную картину изменения во времени интенсивности потока нейтронов или гамма-квантов вблизи индикатора излучений. В приборах применялись устройства и индикаторы, позволяющие регистрировать интенсивность и определять энергию нейтронов или гамма-квантов, возникающих в скважине и приборе.

В Советском Союзе первые импульсные генераторы нейтронов разрабатывались в 1957–1958 гг. под руководством Б.Г. Ерозолимского группой сотрудников лабораторий радиометрии ИГиРГИ АН СССР и Института ядерной физики СО АН СССР.

В 1958 г. первая ускорительная нейтронная трубка, работающая в импульсном режиме, была создана (Ерозолимский, Бондаренко и др., 1959) и применена в скважинном генераторе нейтронов. После тщательных лабораторных испытаний в 1958 — начале 1959 г. генератор был испытан в опытной скважине Московского нефтяного института в Башкирии (рис. 12). Результаты испытаний нового прибора и возможность его использования для исследования нефтяных скважин были обсуждены на Всесоюзном совещании и получили одобрение (Флеров и др., 1958). В полевой сезон 1959 г. на нефтяных промыслах Башкирии был впервые испытан этот импульсный генератор нейтронов для исследования состава горных пород и определения положения водонефтяного контакта в скважинах (Алексеев и др., 1960). В 1963 г. было начато серийное произ-



Рис. 12. Испытания импульсного генератора нейтронов в Октябрьске, 1959 г.

водство импульсных генераторов нейтронов и ускорительных трубок для работы в импульсном и стационарном режимах. Новые трубки постепенно заменяли ампульные изотопные источники при стандартных обязательных скважинных исследованиях.

Остановимся несколько подробнее на истории создания ускорительных трубок для импульсных скважинных генераторов нейтронов. Установки подобного рода применялись в физических лабораториях обычно с использованием вспомогательных средств и не лимитировались занимаемым объемом. Они могли быть достаточно сложными и громоздкими. В скважинном приборе размеры строго ограничены: диаметр не должен превышать 100–120 мм и длина — 4–5 м. Кроме того, в этом случае необходимо учитывать высокое наружное давление (до сотен атмосфер); высокую температуру среды до 50–200°С, систематические вибрации и удары, которые испытывает прибор во время спуско-подъема и измерений, а также небольшую потребляемую мощность и ограниченное количество проводов для подачи питания и осуществления управления работой прибора и т.п. В подобных условиях даже простейшее обеспечение вакуума, в котором происходит ускорение ионов из ионного источника, становится трудной задачей. Если, например, в обычных условиях перепад давлений от 10^{-2} до 10^{-5} мм рт. ст. поддерживается непрерывной откачкой излишков газа из ускорительного отсека, в скважинах почти невозможно обеспечить выхлоп форвакуумного насоса, а работа диффузионного насоса (если бы и удалось поместить подобный насос в габариты прибора) невозможна из-за высокой наружной температуры и ударов прибора о стенки скважины.

При разработке ускорительной трубки основная задача сводилась к обеспечению генерирования мощного потока нейтронов в сильных электрическом и магнитном полях. В варианте ускорительной трубки, представлявшей собой запаянный стеклянный баллон диаметром 40 и длиной 300 мм, для создания необходимого поля подается напряжение около 100 кВ. Под действием электрического поля ионы дейтерия "вытягиваются" из помещенного в трубку металлического цилиндра, ускоряются и начинают бомбардировку находящейся внутри электрода мишени из циркония или титана, насыщенного тритием. Происходит реакция $D + T \rightarrow He + n$, в результате которой освобождаются нейтроны с высокой кинетической энергией до 14 МэВ. В первых трубках описанного типа удавалось получать импульсы ионного тока длительностью 50–200 мкс при ускоряющем напряжении 120 кВ. Сложность заключалась также в том, что для обеспечения заданной работы нейтронной трубки в приборе должны были безотказно работать высоковольтный трансформатор и конденсатор, напряжение на котором было хотя и значительно меньше, чем на трансформаторе, но все же составляло 60 кВ.

С 1961 г. начали разрабатываться ускорительные трубки различных типов как газонаполненные, так и вакуумные (искровые). В газонаполненных трубках во всем объеме в течение длительного времени заданное рабочее давление газа поддерживается неизменным, и трубка в зависимости от схемы включения может работать в приборе как в импульсном, так и стационарном режиме. Газонаполненные нейтронные трубки типа УНГ-1 начали выпускаться серийно с 1962 г. В результате усовершенствования и технологической переработки первоначального варианта Л.Р. Войцику и Б.Г. Ерозолискому (1962) удалось создать довольно простой и, главное, надежный источник нейтронов. В стеклянном цилиндре диаметром 32 и длиной 190 мм для получения излучения использован ионный источник (типа Пеннинга) с осциллирующими электронами в магнитном поле и накаливаемым катодом при сравнительно низком давлении дейтерия порядка $10^{-4} - 10^{-2}$ мм рт. ст. В конструкции трубки предусмотрена защита от пробоев мишени, находящейся под высоким напряжением, слоем жидкой изоляции, которая одновременно является охлаждающей жидкостью. В разработке трубки типа УНГ приняли участие Д.Ф. Беспалов, А.З. Минц и А.С. Школьников.

В 60-х годах была начата разработка универсальных газонаполненных нейтронных трубок типа ТУО под руководством Э.А. Аба. В трубку ТУО как и в трубке УНГ включен управляемый извне геттерный насос, с помощью которого можно понижать давление рабочего газа в трубке (Аб, 1962). Усовершенствование газонаполненных трубок проходило в постепенном уменьшении габаритных размеров с одновременным повышением выхода нейтронов.

Трубки вакуумные (искровые) предварительно не заполняются газом, необходимое количество газа выделяется в виде ионов в момент искрового разряда. За время между импульсами остатки нейтральных газов удаляются из объема трубки, в связи с чем несколько уменьшается время создания новой порции газа. Вакуумные трубки работают только в короткоимпульсных режимах порядка 1–5 мкс.

Серия отпаянных вакуумных нейтронных трубок разрабатывалась почти одновременно в СССР и США, но в США они применялись в физических экспериментах (Gow, Pollock, 1960). Советские вакуумные трубки типа НТ, построенные А.М. Родиным, О.Б. Овсянниковым, В.С. Васиным по аналогичным с американскими общим принципам, обладали рядом преимуществ. В некоторых моделях, например НТ-8, применен удачный способ биполярного питания, при котором одна половина ускоряющего напряжения подается на ионный источник, а вторая — в противоположной полярности на мишень (схема соответствующего генератора нейтронов была разработана Д.Ф. Беспаловым). В связи с принципиальной невозможностью обеспечить стабильность выхода потока нейтронов в вакуумных нейтронных трубках в силу ряда преимуществ наибольшее распространение получили газонаполненные нейтронные трубки (Войчик, 1968).

Первый макет прибора с вакуумной трубкой был создан в СССР Н.В. Поповым и Д.Ф. Беспаловым. В Институте ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ) в начале 60-х годов под руководством Д.Ф. Беспалова были разработаны генераторы нейтронов нескольких типов. Генераторы ИГН-1 и ИГН-2 с нейтронными трубками типа УНГ-1 с 1962 г. начали выпускаться серийно на киевском заводе "Геофизприбор". Первые образцы генератора были выполнены в следующих габаритах: диаметр 102 мм, длина около 3 м. Затем удалось уменьшить диаметр прибора до 90 и даже 60 мм. Серийно выпускаемый генератор предназначался для работы в скважинах с температурой на забое до 100°C. В схеме прибора по предложению Б.Г. Ерозолимского предусматривалось использование трубки УНГ-1 для ускорения ионов дейтерия и в качестве высоковольтного кенотрона, удваивающего создаваемое трансформатором ускоряющее напряжение в 45 кВ. Генератор рассчитан на работу в скважинах диаметром 5" и глубиной до 3000 м (Беспалов, Савосин, 1962).

Управление работой прибора и передача импульсов для регистрации производятся по трехжильному каротажному бронированному кабелю. Наземная аппаратура, состоящая из многоканального временного анализатора импульсов источника питания, пульта управления режимами работы, многоканального осциллографа и других приборов, размещается в автомашине-лаборатории. Импульсный режим работы трубки обеспечивается синхронизацией подачи на электроды ионного источника импульсного напряжения с моментами экстремальных значений переменного напряжения на мишени. В качестве детектора излучений в первых генераторах использовались счетчики медленных нейтронов типа СНМ, заполненные фтористым бором.

В 1960–1963 гг. сотрудниками производственного треста Татнефтегеофизика Ф.А. Куриленко, Л.Н. Воронковым и другими был разработан малогабаритный генератор нейтронов ИГН-10 с трубкой НТ-10 с искровым ионным источником. Прибор диаметром 42 мм предназначался для работы в насосно-компрессорных трубках в скважинах татарских нефтепромыслов при температуре 50–60°C. Примерно в это же время во ВНИИЯГГ был разработан на трубке НТ-14 генератор того же назначения ИГН-42 (диаметром 42 мм), послуживший основой для серийного производства.

В начале 60-х годов импульсные нейтронные методы начали применяться в практике американских геофизических компаний (Yomans, Zimmerman, 1959; Yomans, 1964). Разработанная фирмой "Велз Сервейз Инкорпорейшн" аппаратура стала применяться при исследованиях нефтяных месторождений, проводимых геофизической фирмой "Лэйн Велз Корпорейшн". Фирма и участники разработки получили патенты на конструкцию генератора в целом, источник высокого напряжения генератора и некоторые детали ускорительной трубки, а также на способы использования генераторов в нефтяных скважинах. Прибор длиной в 5 м при диаметре 90 мм работал на семижильном кабеле при температуре до 110°C.

Через год фирма "Шлюмберже" сообщила о создании своего генератора нейтронов с универсальной ускорительной трубкой, работавшего на стандартном фирменном шестижильном кабеле. Несколько позднее генераторы нейтронов для исследования нефтяных скважин применили и другие ведущие геофизические фирмы, такие, как; "Мак-Кулоу", "Джерси Продакшн Резерч", "Дрессер Атлас" и другие.

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ПОРОДАМИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НЕЙТРОННОМ КАРОТАЖЕ

Процесс прохождения нейтронов в горных породах в принципе может быть описан кинетическим уравнением переноса. Однако все еще остаются неясными многие исходные параметры и сам процесс взаимодействия нейтронов с веществом пород. Поэтому наряду с многообразными экспериментальными исследованиями проводились теоретические расчеты возможного распределения нейтронов и гамма-квантов в различных идеализированных средах. При составлении уравнений приходилось вводить многочисленные ограничивающие условия и допущения, учитывающие реальные условия. Задача математического описания процесса в какой-то мере сходна с задачей, решаемой в теории ядерных реакторов, можно даже использовать установленные там некоторые формальные зависимости, но существующие многочисленные различия протекания того и другого процесса затрудняют проведение расчетов и крайне ограничивают возможность использования опыта реакторостроения. К этим различиям следует отнести прежде всего сложность и многообразие химического состава реальных горных пород, близость границ раздела сред с резко отличными нейтронными свойствами, особенности источника излучений и т.п. (Кожевников, 1969). Условия нефтяной скважины создают дополнительные большие затруднения при проведении экспериментальных лабораторных исследований и моделировании процесса нейтронного каротажа на ЭВМ.

В числе первых работ, в которых рассматривалась сначала постановка задачи, а затем и проведение импульсного нейтронного каротажа, были работы И.И. Тальянского с сотрудниками (Глауберман, Тальянский, 1957). Они изучили замедление нейтронов в рамках двугрупповой теории. Получив достаточно сложные формулы, авторы попытались

их упростить и оценить погрешность проведенной аппроксимации. Физический смысл полученных ими формул сводится к тому, что при достаточно большом времени задержки поток нейтронов, приходящий к индикатору прибора по заполненной буровым раствором скважине, становится менее интенсивным, чем поступающий из нефтенасыщенного пласта. На этих расчетах была основана рекомендация обеспечить регистрацию нейтронов в приборе не ранее чем через 10^{-4} с после их излучения.

Под руководством Б.Г. Ерозолимского проведены теоретические исследования и расчеты основных параметров распределения нейтронов в средах, близких по составу и геометрии к горным породам и скважинным условиям. Б.Г. Ерозолимский и А.С. Школьников (1959) рассмотрели распространение тепловых нейтронов в однородном безграничном пласте и попытались оценить возможности применения импульсных методов для практической разведки. Тогда же была предпринята попытка определить время протекания процессов взаимодействия нейтронов с горными породами при импульсном нейтронном каротаже в зависимости от свойств среды и расстояния между источником излучений и детектором (Запорожец, Кантор, 1959). Вывод, вытекавший из первой теоретической прикидки, оказался весьма обнадеживающим: импульсный нейтронный каротаж позволяет раздельно определять среднее время жизни нейтронов в горных породах и коэффициент диффузии тепловых нейтронов. Указанные параметры (время жизни и коэффициент диффузии нейтронов в породах) дают возможность определять петрофизические свойства пород: их пористость и нефтенасыщенность.

В 1960 г. И.И. Тальянский опубликовал еще одну теоретическую работу о распределении нейтронов в двух средах, разделенных цилиндрической границей. Считая, что прибор находится на оси симметрии внутренней среды (по аналогии с прибором, который опускается в скважину во время каротажа), он на основании решения нестационарного диффузионного уравнения рассчитал возможное в подобных условиях распределение надтепловых нейтронов в однорупповом приближении. Были получены формулы, описывающие пространственно-временное распределение нейтронов в двухслойной среде, и определен интервал времени, после которого в скважине будет наблюдаться постепенное преобладание потока тепловых нейтронов, отраженных породой. Для случая заполненной водой скважины, пересекающей насыщенный нефтью пласт (с 10%-ной пористостью), вычислено это время, оказавшееся равным нескольким сотням микросекунд.

Существенный вклад в теорию расчетов различных аспектов процесса импульсного нейтронного каротажа в 50-х — начале 60-х годов внесли С.А. Кантор и его ученики. Одной из важных работ того времени была попытка теоретической оценки глубинности метода импульсного нейтронного каротажа (Кантор, 1961). Рассмотрев окруженную вакуумом среду, ограниченную цилиндрической поверхностью радиуса R бесконечной высоты, на оси которой находятся и импульсный нейтронный источник, и индикатор излучений, С.А. Кантор получил выражение для определения радиуса действия нейтронов, т.е. расстояния, на котором

плотность нейтронов уменьшается на 10%:

$$R_n = 2,1\sqrt{\Theta + Dt},$$

где Θ — символический возраст надтепловых нейтронов; D — коэффициент диффузии тепловых нейтронов; t — время задержки.

Вывод об увеличении глубинности импульсных нейтронных методов с увеличением времени задержки подтверждался его последующей работой, в которой указывалось и на преимущество импульсных методов по сравнению с другими нейтронными методами (Кантор, 1963). Тогда же другими исследователями (Глауберман, Тальянский, 1963) было изучено влияние размеров скважины на изменение истинной картины распределения нейтронов в окружающих породах, например, при увеличении диаметра скважины вдвое поток нейтронов, поступающих в породы, уменьшается в полтора раза. При этом на изменение потока нейтронов достаточно четко должна влиять пористость окружающих горных пород.

В.Ф. Захарченко (1963) рассмотрел происходящий в однородной среде процесс переноса и энергетическое распределение нейтронов, излучаемых точечным монохроматическим источником быстрых нейтронов. Он вычислил среднее время жизни нейтронов в зависимости от пористости насыщенного водой песчаника и временное распределение надтепловых нейтронов в кварцевом песке и воде.

Попытки математического моделирования процессов взаимодействия нейтронов с реальными средами предпринимались и другими исследователями. Все они сводились в конечном счете к описанию какой-либо части процесса, но и эта часть была достаточно сложной и трудоемкой. Необходимость получить надежные и простые формулы определения основных параметров скважинного прибора, используемые при интерпретации результатов измерений, заставила искать новые подходы к составлению и решению уравнений. Теоретические работы в этом направлении усиленно развивались под руководством С.А. Кантора во ВНИИЯГГе. В начале 60-х годов вновь была рассмотрена задача распределения нейтронов для случая импульсного источника тепловых нейтронов в скважине, окруженной однородными горными породами (Поляченко, Кантор, 1963).

Следует отметить также работы Р.А. Резванова и А.Л. Поляченко. В приложении к задачам импульсного нейтронного каротажа А.Л. Поляченко (1963) разработал теоретические основы метода нестационарной диффузии. Его исследования были с интересом встречены в Физическом институте АН СССР. В предложенной им методике решения краевой задачи, к которой свелся расчет диффузионного приближения, дано обоснование применимости интегральных преобразований к решению поставленной задачи при произвольном распределении источников и показано точное ее решение, пригодное для численных расчетов при любых временах задержки. Он получил выражения для распределения тепловых нейтронов во времени в случае, более близком к реальной модели, и теоретически показал возможность раздельного учета информации о пласте и скважине (Поляченко, 1964).

Не останавливаясь на работах других теоретиков ВНИИЯГТа, следует сказать, что в результате проведенных аналитических исследований в 50-х — начале 60-х годов были выяснены общие закономерности процесса взаимодействия импульсного потока нейтронов с горными породами и скважиной. Однако для практической разработки методов и аппаратуры нейтронного каротажа и последующей интерпретации результатов требовалось установление конкретных количественных связей получаемых данных со всем многообразием пород, а также учет мощности пластов и пропластков, их водородонасыщенности, технического состояния стенок скважины и ближней зоны, учет положения прибора в скважине и многих других факторов. Но для того чтобы изучить нейтронные свойства пород, требуются соответствующий прибор и методика измерений. Основные же параметры прибора могут быть выбраны только по результатам точного моделирования происходящего в скважине процесса ядерного взаимодействия потока нейтронов с окружающей средой (породой и оборудованием скважины). Без этих данных, как показал опыт А.И. Заборовского, невозможно определить оптимальную мощность источника излучений, длину зонда, тип индикатора и другие технические данные прибора. В связи с этими противоречиями пошли по пути замены лабораторного моделирования расчетными исследованиями с привлечением численных методов решения задач математической теории импульсного каротажа.

Наиболее общий теоретический численный анализ был проведен И.Г. Дядькиным с сотрудниками (1969), давшими расчет распределения нейтронов в пространстве и во времени по энергии и направлениям движения. Для расчетов они привлекли и развили метод парциальных вероятностей и метод парных столкновений и статистических сумм. С использованием идей Фейнмана был разработан метод решения кинетического уравнения, которое преобразовано в вид, допускающий применение метода статистических сумм, и затем получило вид уравнений "трех столкновений" и "парных столкновений". Результат проведенного математического моделирования послужил основанием для практических выводов.

В Московском нефтяном институте применение численных методов дало возможность Д.А. Кожевникову (1959, 1960; Кожевников и др., 1962) получить в явном виде замкнутое аналитическое решение уравнения переноса нейтронов для любых горных пород, причем полученное решение справедливо для пород произвольного изотопного состава и в любой точке пространства. Исследования Д.А. Кожевникова показали также, что описать единым универсальным законом распределение нейтронов в породах в процессе замедления чрезвычайно трудно и, вероятно, невозможно. В Институте геофизики Уральского научного центра АН СССР с помощью метода синтетических ядер Ю.П. Булашевичем и В.Ф. Захарченко получена система дифференциальных уравнений и определена функция распределения нейтронов, решение дано для случая существования водородосодержащего замедлителя.

В начале 60-х годов во ВНИИЯГТе Р.А. Резвановым (1963, 1964) составлена сводка результатов по методам статистических испытаний

для случая однородной среды. Показано, что на распределение тепловых нейтронов в горных породах оказывает различное влияние содержание хлора и водорода в окружающих средах. Поэтому возможно выделение этих элементов по результатам измерений методами нейтронного каротажа. Большое влияние на показания ИННК оказывают минерализация пластовой воды, размеры зонда и другие факторы.

Методы статистических испытаний, примененные для решения сложных математических задач распределения нейтронов в средах Р.А. Резвановым, С.А. Денисином, В.Е. Лухминским, И.Г. Дядькиными и другими, оказались пригодными почти для всех задач нейтронного каротажа и имели большое практическое значение при разработке методов и аппаратуры. Так, в результате исследований указанными методами распределения нейтронов в случае точечного источника тепловых нейтронов было, например, установлено, что абсолютная и относительная дифференциация показаний против пластов различной влагонасыщенности и насыщенных водой различной минерализации резко возрастает при уменьшении радиуса скважины или увеличении времени задержки; что в сильно поглощающих нейтроны пластах целесообразно применять меры к искусственному уменьшению среднего времени жизни тепловых нейтронов в скважине путем введения в глубинный прибор (или в скважину) сильного поглотителя, например, бора и т.п. (Денисик и др., 1962). Главное преимущество расчетов по сравнению с физическим моделированием в том, что они могут дать одновременно зависимости регистрируемой интенсивности от всей совокупности геометрических и физических параметров прибора и горных пород. Все расширяющееся их использование для решения конкретных геофизических задач привело к тому, что некоторые методы, например, метод математического моделирования Монте-Карло, в ряде случаев не только не уступают физическому моделированию, но и превосходят его по ряду показателей (Дядькин, Понятов, 1966). Применение методов математической статистики в ядерной геофизике постепенно выделилось в новое теоретическое направление и в настоящее время представляет самостоятельную область исследования.

РАЗВИТИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

В середине 60-х годов стали весьма интенсивно разрабатываться различные методы импульсного нейтронного каротажа с учетом полученных соотношений параметров нейтронного потока и горных пород. К началу 70-х годов были разработаны следующие разновидности импульсных нейтронных методов:

1) импульсный нейтрон-нейтронный каротаж ИННК с модификациями, основанными на измерениях тепловых нейтронов ИННК-т, надтепловых нейтронов ИННК-нт, резонансных нейтронов ИННК-р;

2) импульсный нейтронный гамма-каротаж: радиационного захвата медленных нейтронов ИНГК в интегральном и спектрометрическом вариантах;

3) импульсный нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов ИНГК-ГИНР;

4) импульсный нейтронный активационный каротаж ИНАК.

Как видно из названий, при измерениях каким-либо методом выделяется соответствующая составляющая общего ядерно-физического процесса взаимодействия потока нейтронов с горными породами. Так, согласно Д.А. Кожевникову (1974), можно выделить неупругое рассеяние быстрых нейтронов на атомных ядрах, сопровождаемое испусканием характеристического гамма-излучения — "гамма-излучение неупругого рассеяния"; активацию атомных ядер быстрыми нейтронами; деление ядер надтепловыми нейтронами; активацию атомных ядер тепловыми нейтронами; поглощение тепловых нейтронов, сопровождаемое испусканием захватного гамма-излучения; деление тяжелых ядер тепловыми нейтронами. Эти реакции возникают в горных породах под действием нейтронного или гамма-излучения от источника, помещенного в измерительном приборе.

Изучение раздельных спектров, как указывалось, дает возможность определять наличие многих элементов в горных породах (углерод, кислород, кремний, железо, магний и другие).

Важно, что получаемые при импульсных нейтронных методах сведения о среднем времени жизни тепловых нейтронов дополняются данными о скоростях распространения упругих волн в породах, а в ряде случаев и об удельном электрическом сопротивлении пород (Карус, 1972). Благодаря этому методы ИННК целесообразно применять в комплексе с акустическим и электрическим каротажем. Особенно полная информация о свойствах пласта получается при совместной интерпретации результатов измерений методами ИННК и НК (стационарный метод нейтрон-нейтронного каротажа).

Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж и импульсный нейтронный гамма-каротаж стали развиваться одновременно. При обосновании первых методов импульсного нейтрон-нейтронного каротажа была выяснена целесообразность при исследованиях нефтяных и газовых скважин регистрации гамма-излучения, возникающего во время затухания поля тепловых нейтронов в результате их захвата ядрами элементов породы (Ерозолимский, Войчик и др., 1958).

В последующие годы были проведены экспериментальные и расчетные работы по созданию различных модификаций импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, а также методов ИНГК. Результаты исследований, основные методики проведения измерений и интерпретации были сведены в методическом пособии "Основы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа" (1965), разработанном во ВНИИЯГТе под руководством Ю.С. Шимилевича. Сравнение методов ИННК и ИНГК показало, что на достаточно больших временах задержки ценность показаний того и другого метода одинакова, но при работе в заполненных соленой водой скважинах предпочтительнее проводить комплекс ИНГК. Когда же прибор находится в среде, слабо поглощающей нейтроны, создаются более благоприятные условия для измерений методами ИННК, так как можно применять большие времена задержек. Существенным преимуществом

методов ИНГК является возможность изучения энергетического спектра гамма-излучения, несущего информацию об элементном составе пород.

В табл. 3 приведены основные особенности нейтронных методов каротажа нефтяных скважин и возможное их практическое использование (Запорожец, 1967). Следует подчеркнуть, что с разработкой и совершенствованием нейтронных методов исследования нефтяных скважин впервые оказалось возможным дистанционно отличать нефть от воды в разрезе нефтяных скважин, включая и действующие, оборудованные насосно-компрессорными трубками. В проведении испытаний ИННК в скв. 803 Туймазинского нефтяного месторождения в июле—сентябре 1959 г. и обсуждении результатов приняли активное участие главный геолог НПУ Туймазанефть М.Т. Золоев, промысловые геологи и сотрудники Башнефтегеофизики и НПУ Туймазанефть Ю.А. Гулин, И.Л. Дворкин, А.Ш. Галявич, И.В. Головацкая, Н.Г. Нестеренко, Ю.И. Соколов и др., а также сотрудники Татнефтегеофизики Е.Б. Бланков и Т.Н. Бланкова. Во время первых испытаний были выбраны рабочие режимы работы аппаратуры, оптимальные для данных геолого-геофизических условий. Интерпретация результатов измерений помогла оценить влияние изменения пористости, литологического состава пластов, конструкции скважины и других факторов на показания индикаторов.

Импульсные нейтронные методы получили широкое применение в нефтедобывающей промышленности, в 1965—1967 гг. импульсными методами было исследовано около 3000 скважин (табл. 4). Наибольшее количество скважин исследовано в Татарии и Башкирии, поскольку импульсные методы давали возможность регулировать закачку воды и избегать обводнения скважин.

В создании, совершенствовании, опробовании и внедрении импульсного нейтронного каротажа творчески участвовали сотрудники ВНИИЯГГа, лабораторий МИНХиГП, научно-исследовательских институтов, а также тематических партий производственных трестов нефтедобывающих районов.

Особая роль в становлении импульсных нейтронных методов принадлежит нефтяникам Татарии. Характерные для данного района пласты с пористостью свыше 15% при высокой (свыше 150 г/л) минерализации пластовых вод были исследованы С.А. Султановым, В.М. Арбузовым, Е.Б. Бланковым, Ф.А. Куриленко.

По их данным, плотность тепловых нейтронов против нефтенасыщенного пласта, отличается от плотности против водонасыщенного при задержках 1000—1200 мкс почти в десять раз (Султанов, Хорьков, 1962). Измерения методами ИННК и ИНГК в девонских песчаниках Ромашкинского месторождения показали, что для нефтеносных участков пласта характерны высокие значения и четкое выделение зоны водонефтяного контакта на глубине 1684 м (Арбузов, 1967). Обобщив материалы по 98 скважинам, Е.Б. Бланков и В.М. Арбузов построили графики распределения числа скважин в зависимости от насыщения пластов и измеренного декремента затуханий излучений. Проведенные там же исследования Д.Д. Шапиро показали на большом количестве производственного материала преимущества импульсных методов при определении водонеф-

Таблица 3

**Характеристики импульсных нейтронных методов каротажа нефтяных скважин
(по В.М. Запорожцу, 1967)**

	ИННК, ИНГК	ИГГК (интегральный и по C^{12})	ГИНР
Методическое преимущество	Уменьшение влияния ближней зоны, увеличение аномальных эффектов	Уменьшение влияния глинистой корки и раствора. По C^{12} — избирательная индикация к C^{12}	Выявление отношения содержания C^{12} и O^{16}
Задачи, решаемые в геологии нефти	Различение нефти и минерализованной пластовой воды	Оценка плотности и пористости пластов. По C^{12} — выявление нефтенасыщенных пластов	Различение в пластах нефти и пресной воды

Таблица 4

**Объем выполненных в 1965—1967 гг. исследований
(количество нефтяных скважин) импульсными нейтронными методами
(Шимилевич 1968)**

Нефтедобывающий район	1965 г.	1966 г.	1967 г.	Всего
Татарская АССР	270	390	326	986
Башкирская АССР	80	244	299	623
Краснодарский край	69	159	157	385
Украинская ССР	50	80	184	314
Пермская обл.	47	74	75	198
Куйбышевская обл.	22	57	77	156
Азербайджанская ССР	—	7	84	89
Саратовская обл.	6	15	30	51
Итого	544	1026	1230	2800

тяных контактов, измерения которых не чувствительны к затрубной циркуляции жидкости, осолонению цемента, неоднородностям пласта. Он же интерпретировал совместные данные импульсных методов с обычным нейтронным гамма-каротажем и смог четко выделить зоны с затрубной циркуляцией (Шапиро, 1960).

В тресте Татнефтегеофизика задолго до выпуска серийной аппаратуры ИННК были изготовлены своими силами образцы скважинных импульсных генераторов нейтронов и оснащены ими производственные и тематические партии. Геофизики треста, ТатНИИ нефтедобывающей промышленности и объединения Татнефть С.А. Султанов, Р.Х. Муслимов, Г.М. Донов, А.В. Валиханов и другие активно участвовали в разработке методики интерпретации результатов ИННК. Внимание производственных и научных организаций республики к новым методам ус-

корило широкое внедрение импульсных методов каротажа в Татарии. Вскоре они вошли в обязательный комплекс методов для контроля за разработкой нефтяных месторождений и применялись на Ромашкинском месторождении. Успешное внедрение комплекса методов и выделение специальных контрольных скважин для проведения систематических измерений, совершенствование интерпретации измерений создали основу для улучшения технологии добычи нефти (Арбузов, 1968). В результате в Татарии был получен геолого-экономический эффект, оцениваемый в десятки миллионов рублей.

В сложных геологических условиях нефтяных месторождений Краснодарского края при низкой минерализации пластовых вод импульсные методы помогли определить перемещение водонефтяного контакта в зависимости от выработки месторождения. В Краснодаре в исследования ВНИИЯГГ включились Ю.В. Коноплев и Ю.А. Киценко, а расчеты применительно к геологическим условиям Краснодара провели Л.А. Путкардзе, Ю.В. Коноплев и Ф.Ц. Денисик. Было показано изменение во времени плотности распределения нейтронов в скважинах после обсадки (Коноплев, Киценко, 1964). Для Анастасиевско-Троицкого месторождения было установлено распределение продуктивных и водоносных пластов. Но для месторождений Краснодара различие в показаниях против нефтеносных и водоносных пластов оказалось значительно меньше, чем в случаях высокой минерализации пластовых вод. Высокая эффективность ИННК для контроля за эксплуатацией газовых скважин была доказана на месторождениях Украины (А.Д. Трум).

Большое практическое значение имели рекомендации В.Н. Дахнова и М.З. Юсупова о проведении систематических измерений методами ИННК и ИНГК в одних и тех же скважинах с целью наблюдения за изменением характера насыщения пласта (Дахнов, 1963). За три года — с 1958 по 1961 г. — по данным импульсных методов на ряде месторождений было отмечено повышение водонефтяного контакта на несколько метров, что указывало на опасность прорыва "пресной" воды. Получение таких сведений очень важно для регулирования отбора нефти и установления правильного гидродинамического режима работы скважин.

Усовершенствование метода ИННК дало возможность исследовать скважины, сложенные карбонатными породами, в которых мало эффективны все другие методы исследований. Во ВНИИЯГГ была разработана конструкция импульсного генератора нейтронов под руководством Д.Ф. Беспалова при участии Б.М. Бурова, В.В. Миллера, В.П. Одинокова, Н.В. Попова, Д.М. Сребродольского, А.С. Школьников, Ю.С. Шмилевича, обеспечивающая одновременное проведение комплекса радиоактивного каротажа. В комплекс входили нейтронный гамма-метод, ИНГК, импульсный активационный анализ, метод неупругого рассеяния. По показаниям комплекса НГК и ИННК в карбонатном разрезе выделялись продуктивные коллекторы (Куриленко, Хуснуллин, 1967).

Вариант импульсного нейтронного гамма-метода ИНГМ был разработан Н.В. Поповым и Ю.С. Шмилевым. В 1960 г. ИНГМ был впервые испытан на нефтяных промыслах Б.М. Буровым, В.П. Одиноквым,

Н.В. Поповым, Д.М. Сребродольским. В разработке его основ также приняли участие В.Ф. Горбунов, С.А. Кантор, Б.М. Рудык, Л.З. Цлав, В.А. Юдин и др. Затем был предложен импульсный активационный кислородный каротаж, опробованный в 1962 г., ведущая роль в его создании принадлежит Н.В. Попову и Ю.С. Шимилевичу, а также Ю.П. Любавину, Р.А. Джемилеву, Н.Н. Нещадимову, которые разработали макет прибора. Дальнейшее совершенствование кислородного каротажа проводилось под руководством А.И. Кедрова и позднее Л.Н. Воронкова. Этот метод был использован для выделения водоотдающих горизонтов и определения зон затрубной циркуляции.

Теория непрерывных активационных измерений была разработана членом-корреспондентом АН СССР Ю.И. Булашевичем и его сотрудниками.

Необходимо подчеркнуть правильную и дальновидную постановку Д.М. Сребродольским геологических задач измерений и интерпретации данных ИННК.

Со времени организации ВНИИЯГГа руководство дальнейшей разработкой методов, созданием аппаратуры и способов интерпретации результатов было сосредоточено в соответствующих лабораториях этого института. Создание и внедрение аппаратуры проходит под руководством Д.Ф. Беспалова; разработка методики измерений осуществляется А.С. Школьниковым; решение и постановка теоретических задач проводятся под руководством и при участии С.А. Кантора, теоретическими вопросами интерпретации возможных данных импульсного нейтронного каротажа занимается А.Л. Поляченко, математическое моделирование процессов на ЭВМ в 60-х годах проводили С.А. Дениsik, Р.А. Резванов. Следует отметить, что и теоретическими, и практическими аспектами импульсного нейтронного каротажа занимаются помимо ВНИИЯГГа во многих специализированных геофизических, нефтяных и физических научно-исследовательских институтах, а также в тематических партиях производственных трестов нефтяной промышленности. К таким организациям относятся Всесоюзный научно-исследовательский институт промысловой геофизики, Краснодарский и Азербайджанский филиалы ВНИИГеофизики, Нижневолжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефтяной промышленности, геофизические производственные тресты Татарии, Башкирии, Украины, Азербайджана, Краснодарского края, Куйбышевской, Саратовской и других областей, Сибири и Дальнего Востока.

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА РАЗРАБОТКОЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СКВАЖИН (1930—1950 гг.)

При бурении и эксплуатации нефтяных скважин важное, иногда даже решающее значение имеет контроль за герметичностью обсадной колонны, целостностью цементного кольца, правильностью перфорации колонны — соответствия продуктивным пластам, а также установление возможных зон затрубной циркуляции жидкости и сообщения между пластами, определение мест притоков жидкости в скважину, положения поглощающих пластов и проницаемых зон и т.д.

Некоторые из поставленных задач можно решать с помощью резистивметра, термометра и других приборов и методами электрического каротажа. В связи с разработкой и опробованием первых методов регистрации естественной радиоактивности горных пород нефтяных месторождений проводились опыты по применению радиоактивных методов для контроля за техническим состоянием скважин. К.П. Козин, В.Н. Дахнов, Г.С. Морозов, А.А. Коржев и С.Г. Строцкий впервые в Советском Союзе в 1939 г. для этой цели предложили и осуществили закачку радиоактивных изотопов. В буровой или цементный раствор добавлялся единственно доступный в то время радиоактивный излучатель — минерал карнотит. Радиоактивность разреза скважины измерялась до и после закачки раствора. По изменившимся значениям активности пытались определить наличие затрубной циркуляции жидкости, высоту подъема и толщину цементного кольца. Однако карнотит обладал большим периодом полураспада и мог закачиваться только однократно, надолго изменяя общую картину естественной радиоактивности разреза скважины. Кроме того, его добыча производилась в небольших количествах и получить его было трудно. Через год положение с производством и поставкой радиоактивных изотопов изменилось. Появились короткоживущие изотопы, которые были использованы для закачки в скважины. Полученные положительные результаты дали основание для выдачи авторского свидетельства № 66351 с приоритетом от 17 июня 1941 г. К.П. Козину, В.Н. Дахнову, Г.С. Морозову, А.А. Коржеву и С.Г. Строцкому на способ искусственной активации любыми радиоактивными элементами бурового раствора или цемента. В авторском свидетельстве указывалось, что после прогонки раствора через скважину или цементировании ее стенок свободные остатки удаляют и измеряют

радиоактивность, по интенсивности которой судят о пористости, кавернозности пород или изменении толщины цементного кольца.

Несколько позднее в 1943 г. В.Н. Дахновым, А.А. Коржевым, В.Ф. Печерниковым и Г.С. Морозовым был зарегистрирован способ определения мест перфорации при вскрытии нефтяных пластов.

Дальнейшее развитие этой области ядерной геофизики у нас в стране в начале 40-х годов несколько задержалось. Не было работоспособных промышленных приборов для измерения естественной радиоактивности горных пород, дальнейшая работа над совершенствованием конструкции первого образца, испытанного еще в 1937 г., прекратилась в связи с эвакуацией Радиового института из Ленинграда. Еще недостаточное производилось радиоактивных изотопов. Но уже в конце 40-х — начале 50-х годов коллективом ВНИИГеофизики под руководством А.А. Коржева, В.М. Запорожца и А.В. Оболенской были выполнены необходимые научно-исследовательские работы. Методы закачки радиоактивных изотопов начали применяться при контроле за техническим состоянием бурящихся и эксплуатирующихся нефтяных скважин.

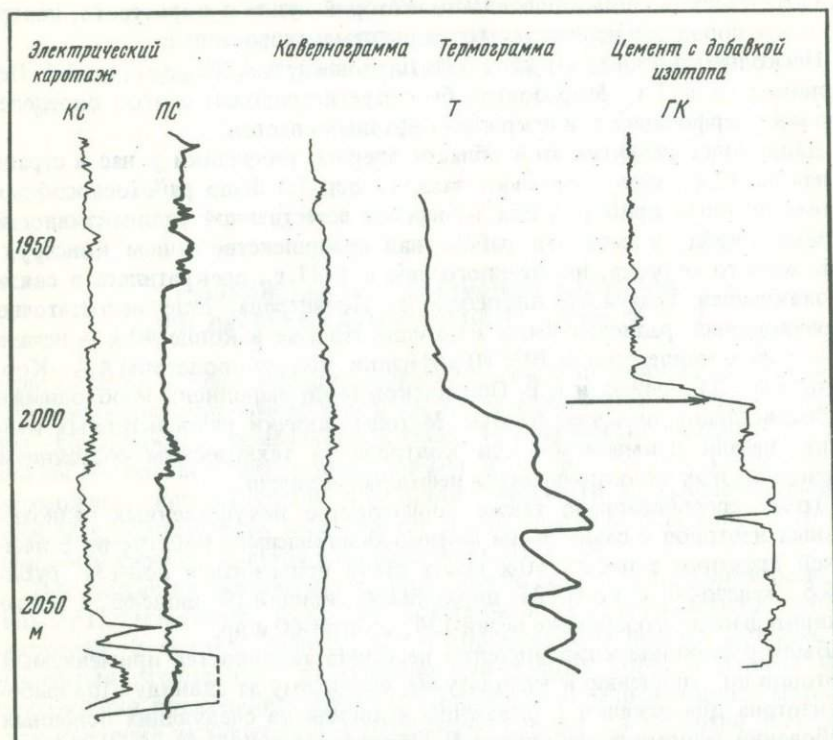
Этому способствовало также производство искусственных радиоактивных изотопов с различными физико-химическими свойствами. В нефтяной практике в начале 50-х годов стали применяться йод-131, рубидий-8, железо-50, сурьма-124, цирконий-95, иридий-19, цинк-65, а также сравнительно долгоживущие цезий-134, кобальт-60 и др.

Были рассчитаны коэффициенты пересчета активностей применяемых изотопов по отношению к кобальту-60, принятому за единицу. При выборе изотопа для закачки в скважины исходили из следующих основных требований, сформулированных А.Н. Оболенской (1957):

- 1) изотоп должен обладать гамма-излучением;
- 2) период полураспада применяемого изотопа должен быть настолько малым, чтобы допускать только двух- или трехкратное проведение измерений одного и того же интервала скважины методами радиоактивного каротажа, но в то же время и достаточно большим, чтобы при доставке изотопа к месту применения не происходило больших его потерь;
- 3) изотоп должен иметь химические соединения, растворимые в воде, а для некоторых работ обязательна растворимость изотопа и в нефти.

В соответствии с этим в середине 50-х годов была разработана простая методика проведения работ, по которой растворимая в воде соль выбранного радиоактивного изотопа добавлялась в буровой или цементный раствор, тщательно перемешивалась. Последующий порядок использования раствора оставался прежним.

Активированный цемент за трубами отмечается при последующих измерениях естественной гамма-активности повышенными значениями. На общем фоне повышенных значений можно выделить максимальные и минимальные значения, соответствующие большей или меньшей толщине цемента. При сравнении полученной кривой с кавернограммой видны участки, соответствующие большему диаметру скважины, где толщина цемента больше, а также четко выделяются каверны и трещины, поглощающие воду или глинистый раствор (рис. 13).



Р и с. 13. Определение высоты подъема цемента с помощью добавления в цемент радиоактивных изотопов

Преимуществом использования радиоактивных изотопов при определении высоты подъема цементного кольца является возможность использования метода при любых, даже самых малых количествах цемента, а также при повторном цементировании. Кроме того, метод радиоактивных изотопов может быть использован для контрольных замеров и проверки высоты подъема цемента независимо от времени заливки цемента и спустя долгое время после заливки, если изотоп выбран с соответствующим периодом полураспада (Выборных и др., 1953). Особенно сказывается преимущество данного метода при исследованиях сверхглубоких скважин и скважин с высокими забойными температурами.

Метод радиоактивных изотопов оказался наиболее надежным и при определении затрубной циркуляции жидкости. В случаях прорыва водоносных пластов при непрочном цементном кольце в скважины может поступать вместо нефти вода. Методика и в таких случаях достаточно проста, она сводится к нагнетанию активированной воды до интервала перфорации, последующей промывке скважины и измерению естественной радиоактивности. Участок с затрубным движением жидкости, содержащий воду с радиоактивными добавками, в особенности поглощающий

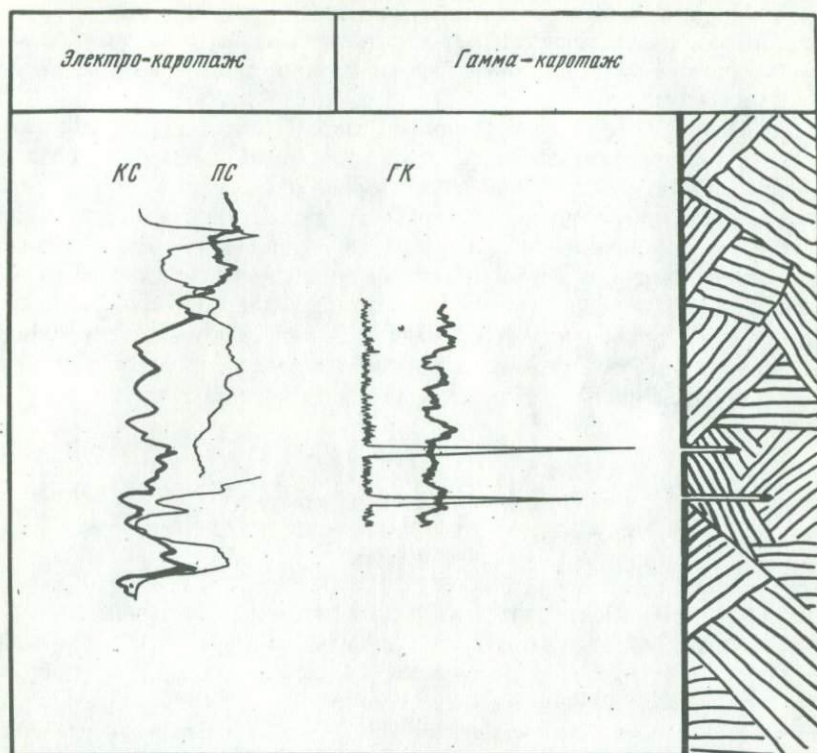


Рис. 14. Установка радиоактивных реперов в разрезе нефтяных скважин

пласт, отмечается повышенными значениями гамма-излучения. В результате измерений по кривой ГК устанавливается довольно точно зона затрубной циркуляции жидкости и могут быть приняты меры к ее ликвидации (углубление забоя, повторный цементаж), т.е. к разобщению пластов.

В начале 50-х годов получили широкое распространение методы радиоактивных реперов и направленного прострела. Еще в процессе бурения при электрическом каротаже устанавливается продуктивный пласт, вблизи которого на определенном расстоянии выстреливается пуля с радиоактивным изотопом. Положение пули четко фиксируется при измерении естественной радиоактивности (рис. 14). При необходимости отбора грунтов из пласта при перфорации прибор с грунтоносом или перфоратор опускаются в скважину вместе со счетчиком. По максимальным значениям счетчика устанавливаются глубина и положение прибора в скважине и затем производится заданная операция — отбор грунта, перфорация стенки скважины и т.п.

Контроль за техническим состоянием нефтяных и газовых скважин с применением радиоактивных изотопов или меченых атомов достаточно широко проводился на нефтяных промыслах Азербайджана, Западной Украины, Майкопа, Краснодара и других районов.

В Башкирии и Татарии этот метод чаще применялся при контроле технического состояния нагнетательных скважин в связи с началом применения вторичных методов добычи нефти (законтурного и внутриконтурного заводнения).

В последующие годы радиоактивные изотопы стали применяться для контроля за коррозией обсадных труб в нефтяных скважинах, а также для определения концентрации ингибиторов, используемых для защиты трубопроводов от коррозии. Эти работы проводились у нас, а также за рубежом организациями и фирмами, поставляющими нефтепромысловое оборудование и трубы. Наиболее интенсивные исследования по созданию новых методик применения изотопов для контроля состояния качества труб проводились фирмами США под руководством многочисленных подкомитетов Американской национальной ассоциации инженеров-коррозионистов (Контроль коррозии промышленного оборудования, 1971).

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА РАЗРАБОТКОЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (1940—1950 гг.)

Вопросы рациональной разработки нефтяных месторождений и увеличения естественной нефтеотдачи пластов находились в центре внимания нефтяников с первых дней установления Советской власти. При обсуждении этой проблемы еще на I Всесоюзном съезде ВНИТО нефтяников в августе 1933 г. в Баку академик И.М. Губкин подчеркивал необходимость предварительного изучения наряду с палеотектоникой, палеогеографией, гидродинамикой и геохимии вод, нефти, горных пород и других физико-химических параметров нефтяных месторождений (Губкин, 1933; Варенцов и др., 1971). В предвоенные годы одновременно с исследованиями гидродинамических процессов месторождений были сделаны попытки определения и внедрения оптимальных режимов эксплуатации отдельных скважин (Каламкаров и др., 1967). Но они сводились только к техническим усовершенствованиям скважинного оборудования — выбору оптимальных соотношений между числом качаний, длиной хода и диаметром насоса для скважин с глубинно-насосной эксплуатацией; подбору диаметра подъемных труб и штуцеров — для фонтанных скважин; разработке конструкций подъемников, регулированию подачи рабочего агента и других факторов — в компрессорных скважинах. Представления о геологических процессах, протекавших в нефтяных месторождениях под воздействием человека, в предвоенные годы были по существу гипотетическими.

Проведение глубокого и всестороннего изучения геолого-геофизических свойств нефтяных пластов, развитие теории газожидкостных подъемников, разработка средств их контроля и регулирования в конце 30-х годов создали основу для успешного внедрения принципиально новых систем разработки нефтяных месторождений. За годы Великой Отечественной войны вопросы разработки новой технологии и систем

добычи нефти несколько отошли на второй план — все внимание было уделено непосредственной добыче нефти.

Несмотря на это, уже в 1942 г. в Московском нефтяном институте имени И.М. Губкина было организовано первое проектное бюро по разработке нефтяных месторождений. На базе основных положений теории и практики промысловой геологии, подземной гидравлики и с учетом экономики в бюро была сделана попытка создать начало теории систем разработки нефтяных месторождений, а вскоре приступили и к практическому приложению теории — проектированию систем разработки нефтяных месторождений.

В конце войны все более активно стали обсуждаться новые тогда вопросы разработки нефтяных месторождений, рационального размещения скважин, а также методы воздействия на пласт с применением закачки газа или воды, контроля за продвижением газодонефтяных контактов в процессе эксплуатации месторождений.

На Всесоюзном техническом совещании Наркомата нефтяной промышленности в начале 1945 г. были подведены итоги многолетних исследований и дискуссий, выработано направление технической политики в разработке нефтяных месторождений и методов добычи нефти. Основной принцип этой политики — установление технологического режима не только для отдельных скважин, но и для пласта в целом с применением искусственного воздействия на пласт.

Практическим осуществлением нового сознательного подхода к управлению энергией пласта в процессе разработки нефтяных месторождений было составление впервые в мировой практике технологической схемы разработки девонских пластов Туймазинского месторождения с закачкой воды в законтурную часть залежи.

С 1945 г. в советской нефтяной промышленности стали во все возрастающем масштабе внедряться методы искусственного воздействия на пласт. Это означало активное вмешательство человека в ход геологического процесса. Методы поддержания пластовых давлений путем закачки воды и газа начали применяться не только в начальных стадиях разработки месторождений, но и на старых, уже истощенных месторождениях, где они получили название вторичных методов эксплуатации.

В 1948–1949 гг. в Татарии было открыто Ромашкинское нефтяное месторождение со сложным геологическим строением. Было предложено пробурить нагнетательные скважины и водой как бы разрезать это месторождение на отдельные площади и каждую разрабатывать независимо.

В результате осуществления новых принципов разработки Ромашкинского месторождения удалось в 1951 по 1962 г. довести добычу нефти с 0,7 до 50 млн. т, что составляло в то время 25% всей добычи страны, а затем и до 100 млн. т.

Широкое использование искусственного воздействия на пласт путем закачки воды увеличивало опасность обводнения и выхода из строя высокодебитных скважин и требовало надежных и действенных мер контроля за продвижением фронта закачиваемой воды. Поскольку и эксплуа-

тационные, и нагнетательные скважины закреплены стальными трубами для контроля за разработкой нефтяных месторождений требовались неэлектрические методы. Наиболее пригодными оказались радиоактивные методы, в том числе применение изотопов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ "МЕЧЕНОЙ" ЖИДКОСТИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ (1950—1960 гг.)

Осуществление контроля за разработкой нефтяных месторождений с поддержанием пластовых давлений или при "разрезании" залежей и других видах активного воздействия на залежь требует проведения специальных исследований в нагнетательных и эксплуатационных скважинах. Для этого предварительно выбирается пористый пласт в нагнетательной скважине и путем пробной прокачки активированной короткоживущими изотопами жидкости определяются границы проницаемых пород. Для увеличения приемистости скважины применяется дополнительно "гидравлический разрыв пласта". Для этого жидкость под большим давлением закачивается в выбранный пласт, существующие трещины и каверны несколько расширяются и образуются новые. Вместе с жидкостью в пласт нагнетается крупнозернистый кварцевый песок, который, попадая в трещины и каверны, сохраняет их открытыми для дальнейшего поступления воды и после снятия высокого давления. С этого момента можно считать, что нагнетательная скважина и пласт подготовлены к закачке воды. Если первые порции воды отметить примесью соответствующих изотопов, то по показаниям приборов в скважинах можно определять направление и скорость ее движения и получать пространственное представление о ходе геологического процесса заводнения и отбора нефти.

Первоначально, в конце 40-х — начале 50-х годов предполагалось, что достаточно в нагнетаемую воду добавить хорошо растворимую соль какого-либо гамма-излучателя и можно отмечать приход закачиваемой воды в наблюдательных скважинах по повышению естественной радиоактивности при гамма-каротаже, а эксплуатационных — по исследованиям отбираемой вместе с нефтью воды. Однако подходящего для этой цели изотопа в первые годы не нашли и в разных районах использовали имевшиеся в наличии самые разные изотопы. Но оказалось, что в процессе миграции закачиваемой воды изотопы адсорбируются горными породами. Для уменьшения адсорбции предпочтительнее употреблять для закачки такие радиоактивные элементы, стабильные изотопы которых уже присутствуют в пластовых водах. К подобным элементам относятся, например, натрий, кальций, магний, хлор и др. Но их изотопы, как правило, короткоживущие и не могли успешно применяться для исследований технического состояния скважин.

Наиболее подходящим изотопом мог быть тритий (H^3). Исследованиями с целью определения возможности его применения для контроля за разработкой нефтяных месторождений, по предложению Г.Н. Флерова, начали заниматься в 50-х годах в Спецлаборатории Института нефти АН

СССР, а с 60-х годов — во ВНИИЯГГе. Однако тритий в природе существует в чрезвычайно малых количествах и получить его для использования в широких масштабах в то время не представлялось возможным. Кроме того, определение его содержания было весьма трудоемким, поскольку тритий — радиоактивный бета-излучатель низкой энергии. Чтобы определить его присутствие в пластовой воде, необходимо было проводить лабораторный анализ проб. Все это осложняло использование трития для контроля за продвижением фронта закачиваемой воды.

Первое удачное широкое применение трития в СССР для изучения движения жидкости в нефтяном пласте между скважинами было проведено Ф.А. Алексеевым, В.Н. Сойфером, Я.Н. Финкельштейн в 1956—1957 гг. На ряде месторождений Северного Кавказа с помощью закачки воды с тритием была установлена связь между отдельными пластами мощных массивов трещинных коллекторов. По полученным результатам можно было сделать вывод о единой системе залежей, входящих в общий резервуар. Следовательно, могла быть дана практическая рекомендация для проектов разработки залежей о размещении общей сетки скважин.

В последующие десятилетия исследования трития в пластовых и поверхностных водах приобрели самостоятельное значение. По содержанию трития определяется режим открытых водоемов, проводятся поиски запасов грунтовых вод, устанавливаются водопритоки в шахты и рудники и т.п. (Романов, Сойфер, 1968). Прогресс в измерительной технике обеспечивал возможность измерений ничтожного количества трития в природных водах. Установлено, что разница в содержании трития в пластовых и речных водах достигает двух-трех порядков. Это обстоятельство позволило отказаться от применения закачки изотопов для контроля за продвижением фронта воды по нефтяному пласту и проводить наблюдения только по изменению содержания трития. При закачке в скважины только речной или другой поверхностной воды можно с помощью чувствительных приборов узнать о приближении воды по резкому увеличению трития. Систематические наблюдения за содержанием трития в пластовых водах дают возможность определять время прихода закачиваемой воды даже более точно, чем при закачке воды с растворенными изотопами.

Применение короткоживущих изотопов, начавшееся в 50-х годах, оказалось наиболее эффективным для контроля технического состояния скважин, а также для определения затрубной циркуляции при гидравлическом разрыве пластов по методике, разработанной под руководством В.М. Запорожца и И.Г. Жувагина.

Поскольку в 50-х и 60-х годах попытки применения радиоактивных изотопов для контроля за продвижением закачиваемой в пласт воды не были эффективными, для этой цели применяли с большим или меньшим успехом различные ядерно-физические методы исследования скважин. Помимо установления коллекторских свойств пласта (пористости, нефтенасыщенности и т.п.) главной задачей новых радиоактивных методов было установление точного положения водонефтяного контакта и воз-

возможность наблюдения за его перемещением в процессе разработки месторождения. Надо было в отдельных наблюдательных скважинах по частным проявлениям общего гидрогеологического процесса выявить его динамические характеристики и получить необходимые данные для его регулирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ОБВОДНЕНИЕМ СКВАЖИН

Одним из первых методов, позволивших надежно устанавливать положение контакта нефть—вода в нефтяных скважинах, был стандартный метод нейтронного гамма-каротажа (НГК). В 1951—1954 гг. партии Туймазинской геофизической конторы треста Башнефтегеофизика и Спецлаборатория Московского нефтяного института имени И.М. Губкина установили, что относительная разница в интенсивности вторичного гамма-излучения против нефтеносного и водоносного пластов составляет 10—15%. Введение борного окружения кожуха глубинного прибора повышает эффект за счет снижения регистрируемого излучения скважины до 20—25%.

По данным треста Куйбышевнефтегеофизика, применявшего радиоактивные методы с 1952 г., при определении водонефтяного контакта (ВНК) методом НГК на основных нефтеносных площадях района различие в показаниях также не превышало 15% (Мещеряков, 1960). Проведенный анализ кривых НГК для установления ВНК в угленосном горизонте Мухановского месторождения, например, показал, что из 41 исследованной скважины в 30 четко показаны границы пластов и положения ВНК.

Но несмотря на, казалось бы, убедительные результаты определения ВНК по данным нейтронного гамма-каротажа, при проектировании систем разработки для таких месторождений, как Туймазинское и Ромашкинское, было предусмотрено бурение большого числа специальных контрольных скважин на высокодебитные девонские пласты. Это были скважины с открытым забоем, в которых возможно проведение электрических замеров. Бурение и содержание таких скважин стоило очень дорого, а своего назначения они полностью не выполняли, поскольку в условиях высокой минерализации пластовых вод классические электрические методы зачастую оказывались малоэффективными (Шапиро, 1960). В конце 50-х годов были проведены комплексные измерения НГК и нейтрон-нейтронным методом (ННК), совместная интерпретация этих данных давала вполне определенные сведения о пластах и положениях ВНК.

В наиболее сложных случаях в Башкирии и Татарии проводились дополнительные измерения методом наведенной активности. Была также разработана методика комплексных измерений для определения характера пластов и положения ВНК в карбонатных породах высокой и средней пористости, характерных для нефтеносных пород Куйбышевского Поволжья (Цлав, Лаптев, 1968). Но и при комплексных измерениях не всегда возможна определенная геологическая интерпретация полученных величин. Так, при исследованиях нефтеносных пород Куйбышевского

нефтедобывающего района методами НГК и НК-т каротажные диаграммы для случая, когда формы кривых сопоставимы и направления измерений совпадают, можно трактовать следующим образом:

1) как безводную скважину и перфорированные пласты или перфорированные пласты в обводненной скважине;

2) совпадение формы кривых НГК и НК-т может означать наличие как нефтеносных пластов, так и поглотивших пресную воду или обводненную пресной водой;

3) совпадение кривых НГК и НК-т и высокие значения НГК при повторных замерах указывают на недавно обводненный пласт или обводненные пласты, поглотившие небольшое количество цемента;

4) несовпадение формы кривых для случая, когда НГК повышено, а НК-т понижено и даже имеет отрицательные значения, возможно при измерениях против водоносных пластов или уже неработающих нефтеносных пластов или при радиоактивном загрязнении скважины, которое можно точно установить дополнительным проведением ГК;

5) несовпадение кривых НГК и НК-т обычно бывает в зоне пластов со слабосоленой водой или в зоне нефтеносных пластов с осолоненным цементом.

Как видно, при комплексных измерениях методами НГК и НК-т неоднозначность толкования полученных данных оставалась в ряде случаев. По данным В.П. Одинокова, Б.Г. Ерозолимского и Ю.С. Шимилевича, основной помехой было осолонение цементного кольца против водоносных пластов. При этом смещение границ осолонения цемента относительно положения ВНК в пласте вызывает искажение кривых НК-т и НГК из-за весьма ограниченной зоны чувствительности этих методов.

Отмеченные при исследованиях нейтронными методами аномалии могут быть связаны с пластами с пресной водой или с нефтеносными пластами, в которых пластовые воды стали постепенно опресняться за счет притока закачиваемой воды. В процессе законтурного и внутриконтурного заводнения первые порции воды, вытесняя нефть, смешиваются с реликтовыми пластовыми водами и осолоняются за их счет. Соленость последующего потока довольно быстро снижается. Скорость процесса опреснения пластовой воды и степень окончательного опреснения дают основные данные о динамике гидрогеологического режима нефтеносного пласта в результате воздействия на него потока закачиваемой воды. Если удалось отметить начало процесса опреснения и принять соответствующие меры (изменения закачки воды, отбора нефти и др.), то можно надеяться, что эти меры будут достаточно действенными. Если же момент начала опреснения не замечен из-за не вовремя проведенных измерений или по другим причинам, то последующие измерения не дадут возможности установить истинную картину происходящего процесса обводнения (или, может быть, состояния) скважины и она может быть потеряна.

Необходимость проведения систематических наблюдений за движением фронта закачиваемой воды и соответствующим изменением положения водонефтяного контакта выявилась особенно остро в первые годы эксплуатации Ромашкинского нефтяного месторождения в Татарии. С

развитием нейтронных методов каротажа эту задачу выполняют периодические замеры нейтронных параметров в действующих скважинах.

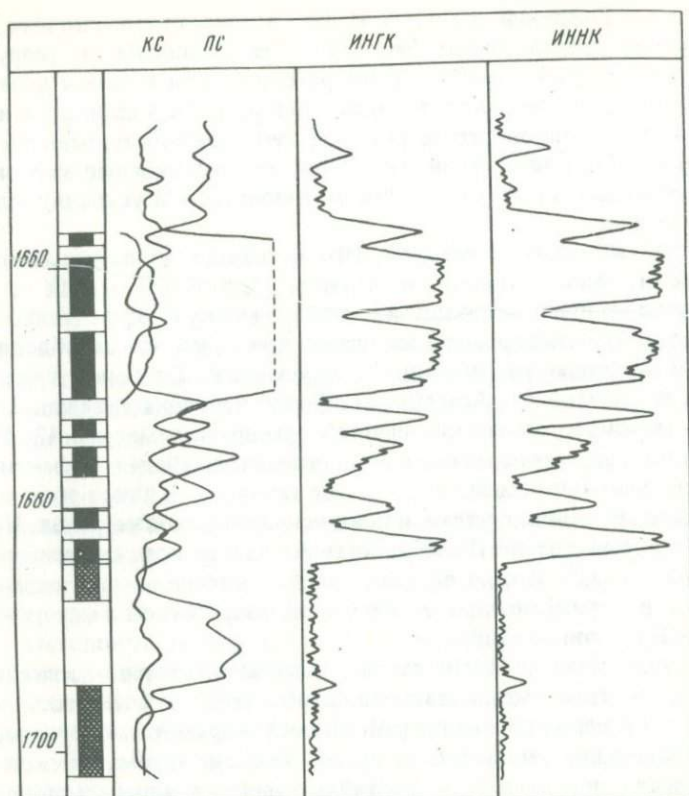
В начале 60-х годов в Татарии проводились наблюдения за движением пластовых вод по созданной там методике (Бланкова, 1968): проводятся замеры естественной радиоактивности, затем исследуемая точка облучается нейтронами и замеряется спад наведенной активности (Бланков, Бланкова, 1960). Для замера использовался малогабаритный прибор, изготовленный в местных геофизических организациях.

Почти одновременно с методом наведенной активности для контроля за разработкой нефтяных месторождений стали все шире внедряться импульсные нейтронные методы исследования нефтяных скважин.

ЗНАЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА РАЗРАБОТКОЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Высокая эффективность импульсных нейтронных методов при расчленении терригенных коллекторов по нефтенасыщенности обеспечила методом ИННК и ИНГК широкое внедрение для целей контроля за разработкой нефтяных и газовых месторождений (Бланков, Куриленко, 1968). Успех методов ИННК объяснялся тем, что при исследованиях обсаженных скважин с высокой минерализацией пластовых вод (характерных для месторождений Урала — Поволжья) получались сложные кривые — экспоненты с разными постоянными времени. Причем для водоносных пластов записывалась экспонента только с одной постоянной времени, поскольку и скважина, и пласт интенсивно поглощают нейтроны. А против нефтеносных кривая спада плотности тепловых нейтронов была двухкомпонентной за счет неоднородности среды "скважина—пласт" с постоянными времени около 100 мкс и более 300 мкс. Железо обсадной колонны и осолоненный цемент затрубного пространства содержат интенсивные поглотители нейтронов, а нефтеносный пласт — слабые. В связи с этим нейтроны, замедлившиеся в скважине, частично поглощаются, а затем к детектору в прибор из пласта мигрируют нейтроны. Против нефтеносных пластов поток нейтронов интенсивнее, чем против водоносных. Это явление и определяет малую величину помехи от скважины и относительно большую зону чувствительности импульсных методов.

Использование методов ИННК для контроля за разработкой нефтяных месторождений несколько задерживалось из-за отсутствия малогабаритных приборов (диаметром 40—42 мм), которые могли бы осуществлять измерения через насосно-компрессорные трубки без остановки скважин. Измерения проводились с помощью прибора большого диаметра. На промыслах охотно шли на остановку даже высокодебитных скважин для проведения ИННК. При комплексировании ИННК с другими геофизическими методами могли получать исчерпывающие данные для однозначного решения. При этом предварительно методом НГК определялась, например, пористость пластов, а затем обрабатывались данные ИННК. Поскольку ИНГК дает возможность определять пористость пород,



Р и с. 15. Определение водонефтяного контакта в скважинах Ромашкинского месторождения электрическими и радиоактивными методами каротажа

1 — нефтеносные пласты; 2 — водоносные пласты

то при комплексировании этого метода с ИННК достаточно хорошо расчленяются, например, карбонатные нефтеносные и водоносные пласты башкирского яруса (Цлав, 1965). Положение водонефтяного контакта на Кулешовском месторождении устанавливалось методикой Волжского отделения ИГИРГИ по данным систематических измерений ИННК в скважинах. При повторных измерениях зона ВНК и обводненных пропластков четко выделялась на диаграммах. В результате систематических измерений ИННК на месторождениях Куйбышевской области, начатых в 1963 г., определена скорость перемещения ВНК и получены данные для регулирования закачки воды и отбора нефти на различных месторождениях области.

Особенно эффективными оказались исследования методом ИННК в комплексе с другими методами карбонатных отложений фаменского, турнейского, башкирского и других горизонтов на нефтяных площадях Волго-Уральской провинции (Алексеев, 1968) (рис. 15). Началось иссле-

дование месторождений методом ИННК в широких масштабах. Было подтверждено предсказанное некоторое "рассасывание" и разрушение зоны проникновения бурового фильтра с течением времени вследствие диффузионного обмена солями с пластовой водой в водоносных пластах и действия гравитационного эффекта за счет различия плотностей нефти и фильтрата и других причин. Показано, что нефтеносные карбонатные пласты достаточно резко отличались от водоносных в условиях, близких к естественным.

Особенно интенсивно методы ИННК начали применяться на Ромашкинском месторождении в Татарии. Внедрение ИННК в этом нефтеносном районе показало их более высокую эффективность по сравнению со стационарными методами при контроле за обводнением пластов в процессе разработки месторождений. Особенно важен был контроль за работой высокодебитных фонтанирующих скважин. Именно в таких скважинах применение малогабаритного (диаметром 42–45 мм) импульсного генератора нейтронов оказалось наиболее эффективным, поскольку фонтанирующая жидкость не поступает в пласт и не создает статического давления, систематически искажающего измерения. Предполагалось, что проведение ИННК в Ромашкино и на всех скважинах больших месторождений можно оценить как проявление научно-технической революции в осуществлении контроля за разработкой месторождений (Бланков, Куриленко, 1968).

На Украине методы ИННК начали применяться в ряде скважин Радченковского месторождения в песчано-карбонатной толще триаса и песчаной толще отложений верхней перми (Белый и др., 1968). Эти материалы были использованы также для создания методов автоматической обработки данных с помощью ЭВМ для наблюдения за изменением положения ВНК со временем (Ильина, 1962). Успешно применялись и применяются методы ИННК и в других районах, месторождения которых характеризуются слабоминерализованными пластовыми водами.

Применение импульсных нейтронных методов в комплексе с другими методами дало возможность достаточно надежно следить за продвижением по продуктивному пласту закачиваемых вод, изменением во времени положения водонефтяного контакта в каждой скважине, изменением водородонасыщенности продуктивных пластов, техническим состоянием самих скважин, определять влияние скважины и ближней зоны на показания приборов и получать ответы на многие вопросы, связанные с контролем гидродинамического режима месторождения в процессе его эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии самостоятельного направления отечественной ядерной геофизики применительно к исследованиям месторождений полезных ископаемых можно наметить следующие основные периоды:

1) подготовительный период — с момента открытия явления радиоактивности до первых опытов радиометрической съемки полезных ископаемых (конец XIX в. — первые десятилетия XX в.);

2) зарождение методов исследования месторождений полезных ископаемых, связанных с разведкой радиоактивных руд и изучением радиоактивности пород и нефтяных пластовых вод (до середины 30-х годов);

3) период становления ядерно-физического направления в геофизических исследованиях нефтяных месторождений (до конца 50-х годов).

В подготовительном периоде русскими учеными были сделаны важные шаги в освоении физических и геологических аспектов открытия явления радиоактивности. Академия наук в 1907 г. по представлению А.П. Карпинского, Ф.Н. Чернышева, В.И. Вернадского приняла решение начать систематическое изучение радиоактивных минералов на территории России. Во главе этой работы должны были стоять русские учреждения (Вернадский, 1911). В.И. Вернадский указывал на необходимость и важность определения мировых запасов радиоактивных элементов. Благодаря его активной деятельности до начала первой мировой войны были проведены обследования на радий некоторых районов Средней Азии, Сибири, Забайкалья, Урала и Кавказа. Началось изучение геохимии радиоактивных минералов.

Зарождение первых радиоактивных методов исследования полезных ископаемых относится к началу 20-х годов, когда впервые была проведена радиометрическая съемка при поисках радиоактивной минеральной лечебной воды на Алтае и Кавказе. Затем радиометрическая съемка начала весьма успешно применяться для разведки радиоактивных руд и минералов, и, что главное, с помощью новых методов появилась возможность ускоренного обследования геологических коллекций для обнаружения радиоактивных минералов и получения тем самым указания для более детального изучения района находки этих минералов.

Открытие высокой радиоактивности нефтяных буровых вод, сначала в Гейдельберге, а затем на Ухте, привлекло внимание к исследованиям радиоактивности именно нефтяных месторождений. По инициативе В.И. Вернадского в конце 20-х годов началось обследование на радиоактивность нефтяных месторождений Советского Союза. Работы прово-

дились под руководством Радиевого института с целью изыскания промышленных источников добычи радия и изучения геохимии радиоактивных элементов. Начались усиленные работы по изучению радиоактивных свойств минералов и газов в лабораториях института.

К середине 30-х годов можно отнести начало следующего периода, когда стали проводиться более углубленные специальные исследования нефтяных месторождений и в 1935 г. был создан В.А. Шпаком, Г.В. Горшковым, А.Г. Граμμαковым и Н.М. Лятковской первый производственный метод определения горных пород по их радиоактивности, получивший название гамма-каротажа. Уже через два года после опубликования результатов опробования на Сызранском нефтяном месторождении (1937) метод гамма-каротажа начали активно применять американские геофизические фирмы (Шаллер, 1956). В последующие годы в США значительно усилились научные исследования в этой области и началась разработка различных модификаций гамма-каротажа и соответствующей аппаратуры. Ускорению работ способствовало участие физиков высокой квалификации. В начале 40-х годов помимо дальнейшего развития гамма-каротажа в США был осуществлен нейтронный гамма-каротаж (Pontecorvo, 1941), разработка которого была основана на проведении достаточно тонких и сложных физических экспериментов.

В СССР в течение нескольких лет из-за разразившейся Великой Отечественной войны и эвакуации научно-исследовательских институтов из Ленинграда гамма-каротажом фактически не занимались. В 1942 г., несмотря на тяжелые условия военного времени, работа по созданию производственных радиоактивных методов исследования нефтяных скважин возобновилась. Но в тот период разработка методов радиоактивного каротажа и аппаратуры в нашей стране оказалась мало эффективной.

Необходимость восстановления геологической документации в освобожденных районах страны определила довольно жесткие требования к геофизическим методам исследования скважин. В условиях работающих с закрепленными стенками скважин, не доступных для исследования методами электрического каротажа, перспективными могли быть только ядерно-физические методы, с помощью которых возможно получать информацию о горных породах даже при наличии стальной обсадной колонны. По инициативе академика Л.С. Лейбензона и профессора Б.Б. Лапука в Московском нефтяном институте в 1947 г. были организованы Специальная лаборатория по использованию достижений ядерной физики в нефтяной промышленности и Ученый совет по той же проблеме. Особое значение имело участие в исследованиях будущего академика, Героя Социалистического Труда Г.Н. Флерова, создавшего научную школу по ядерной геофизике. В работе Совета и обсуждении результатов принимали участие академики И.В. Курчатов, Л.С. Лейбензон; члены-корреспонденты Ю.П. Булашевич, В.В. Федьинский; известные физики и геофизики — Г.Р. Гольбек, В.Н. Дахнов, Б.Г. Ерозолимский, С.Г. Комаров, А.А. Коржев, Н.К. Кухаренко, В.Ф. Печерников, Л.С. Полак, Д.М. Сребродольский и многие другие.

Благодаря правильной постановке и разрешению физической задачи, а также новой форме научного и технического сотрудничества лаборатории с научными учреждениями и производственными предприятиями удалось в короткие сроки разработать ядерно-физические методы исследования нефтяных скважин и начать серийно выпускать соответствующую аппаратуру, которые по мере разработки внедрялись в практику нефтедобывающих предприятий.

В этот период в СССР разрабатывались методы радиоактивного каротажа с применением постоянного изотопного источника. Особенно интенсивно — нейтронные методы, основанные на регистрации замедлившихся нейтронов ННК или гамма-квантов (НГК), возникающих при захвате быстрых нейтронов ядрами элементов горных пород при облучении источником прибора. В создании и испытании первых отечественных приборов нейтронного каротажа нефтяных скважин особая роль принадлежит Г.Н. Флерову, Б.Б. Лапуку и Л.С. Полаку. Позже основной вклад в разработку конструкции и схемы приборов внесли Д.Ф. Беспалов, Г.Р. Гольбек, Б.Г. Ерозолимский.

Первые приборы нейтронного и гамма-каротажа с начала 50-х годов широко применялись в Башкирии и Татарии. Существенную помощь оказали эти методы при восстановлении геологической документации на нефтяных промыслах освобожденных районов Кубани и Западной Украины.

Дальнейшее развитие теории и усовершенствование приборов нейтронного каротажа дали возможность создавать различные методы для решения более широкого круга задач. А.А. Коржевым еще в конце 40-х годов была высказана мысль о возможности применения нейтронного активационного анализа в нефтяных скважинах. В 50-х годах в нашей стране и в некоторых иностранных геофизических фирмах приступили к разработке управляемых источников излучений. Были созданы первые образцы генераторов, создающих стационарное поле нейтронов. Создание управляемых источников излучений достаточной мощности и малых габаритов, пригодных для работы в нефтяных скважинах, оказалось довольно трудной научно-технической задачей. Потребовалось много времени для окончательной отработки скважинного генератора нейтронов. Необходимо подчеркнуть решающее значение для всего последующего развития ядерной геофизики нового более общего методологического подхода к изучению взаимодействия нестационарного импульсного потока нейтронов с ядрами элементов горных пород во времени (Флеров, 1956).

Пространственно-временное и энергетическое распределение нейтронов и гамма-квантов в горных породах дает некоторое представление о протекающих сложных ядерных процессах взаимодействия потока нейтронов и гамма-квантов с веществом горных пород в их естественном залегании. Внедрение импульсных нейтронных методов началось в 1962 г. в Татарии. Разработанные во ВНИИЯГТе под руководством Д.Ф. Беспалова и опробованные в Татарии импульсные генераторы нейтронов стали серийно выпускаться Киевским заводом геофизического приборостроения МГ УССР с 1963 г., и с этого времени импульсные методы применяются

для исследования многих тысяч нефтяных и газовых скважин Башкирии, Татарии, Азербайджана, Краснодара, Урало-Поволжья, Западной и Восточной Сибири, Средней Азии, Прикаспийской впадины и других районов нашей страны, а также Польши, Венгрии, ГДР, Болгарии и других стран.

Усиленное внимание к созданию новых радиоактивных методов исследования скважин со стороны нефтяников связано также с необходимостью контроля за разработкой нефтяных месторождений. Начиная с 1945 г. в нефтяной промышленности СССР во всевозрастающих масштабах внедряются методы искусственного воздействия на продуктивные пласты путем закачки воды или газа. Сознательное управление энергией пласта в процессе разработки месторождения могло осуществляться только при систематическом контроле за движением контура закачиваемой воды и изменением положения водонефтяных контактов в каждой скважине. На первом этапе внедрения новых прогрессивных методов разработки месторождений применялась закачка контрольной "меченой" жидкости или газа, затем были найдены косвенные методы определения положения ВНК по данным различных видов ядерно-физических исследований. В последние годы при контроле за разработкой месторождений широко используются комплексы ядерно-физических, в основном импульсных методов.

Импульсные нейтронные методы весьма эффективно применяются с целью доразведки разрабатываемых нефтяных месторождений. Выявление пропущенных продуктивных горизонтов и залежей дает возможность переводить обводнившиеся нефтяные скважины на эксплуатацию новых пластов и получать дополнительную нефть без капитальных затрат на обустройство скважин и промыслов. Получаемый экономический эффект исчисляется только в Татарии, например, в 5 млн. руб., а в Тюмени — 1,5 млн. руб.

К настоящему времени разработано большое количество разнообразных ядерно-геофизических методов исследования месторождений полезных ископаемых. Они в основном разделяются по виду источника возбуждения физического поля (естественное излучение ядер радиоактивных элементов горных пород и вызванное излучение под воздействием источника в приборе); виду регистрируемого излучения (α , β , γ , n и др.) или характеру изучаемого поля (методы, основанные на измерениях стационарного поля, импульсные методы, спектрометрические методы).

Научным и координирующим центром в разработке ядерно-геофизических методов является Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной геофизики и геохимии (директор Е.В. Карус), организованный в 1961 г. в г. Москве и являющийся единственным в мире институтом ядерно-геофизического профиля. Научными центрами по-прежнему остаются лаборатория Московского института нефтехимической и газовой промышленности (заведующий А.И. Холин), а также лаборатория Института геологии и геофизики СО АН СССР в г. Новосибирске (заведующий Е.М. Филиппов) и Уральский институт геологии и геофизики Уральского научного центра АН СССР в г. Свердловске под руководством Ю.П. Булашевича. Созданы соответствующие научные подразделения в Татарии — ТатНИПИ (руководитель С.А. Султанов), Башкирии —

ВНИИПромгеофизика (И.Г. Жувагин и В.М. Арбузов), Саратов — Нижневожский институт геологии и геофизики (В.П. Иванкин), в Азербайджане, Тюмени, Сибири, на Украине и Северном Кавказе. Кроме того, в основных нефтедобывающих районах работает сеть научно-исследовательских лабораторий и тематических партий в производственных геологических предприятиях. Аналогичная сеть создана в угольной и других отраслях горнодобывающей промышленности.

В дальнейшем развитии ядерной геофизики наиболее важным и перспективным направлением можно считать развитие методов, обеспечивающих точное и полное определение физико-химических и петрографических параметров пласта — пористости, проницаемости, общих и извлекаемых запасов нефти и других данных, необходимых для составления проектов разработки нефтяных месторождений и установления сроков их эксплуатации, а следовательно, определения масштабов и сроков строительства нефтепромыслов, поселков, заводов, нефтепроводов и т.п.

Следует более интенсивно разрабатывать способы количественной интерпретации данных нейтронных (в первую очередь, импульсных) ядерно-физических методов.

Несомненно перспективным можно считать дальнейшее развитие методов элементного анализа горных пород и флюидов с целью добычи полезных ископаемых, не связанных с добычей нефти. К этому направлению относятся методы оперативного элементного анализа шлама, керна и других образцов, поступающих из скважин на поверхность, а также спектрометрии элементного состава горных пород разреза скважин. Определение с помощью нейтронных методов содержания кремния, алюминия, кальция, калия, радия, урана, железа, серы, рубидия, тория, магния в шламе и флюидах, выносимых буровым раствором из скважины при бурении, в последние годы начато во Всесоюзном институте ядерной геофизики и геохимии Министерства геологии СССР и Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Развитие спектрометрии естественного гамма-излучения с помощью новых полупроводниковых детекторов должно дать возможность осуществлять непрерывную запись спектра излучения на всех интересных участках разреза нефтяных и рудных скважин. Выделяя линии отдельных элементов на выбранных участках спектра энергии гамма-излучения, вероятно, можно будет производить непрерывную запись кривых калия, урана, тория и других элементов.

Перспективным также можно считать использование изотопных источников излучения. Однако "возврат" к изотопам должен проходить на более высоком уровне за счет применения тяжелых трансурановых элементов с большим выходом нейтронов при выполнении необходимых мер безопасности. Для экспериментальных исследований возможно применять, например, калифорний-252, преимуществом которого по сравнению даже с генераторами нейтронов является большой выход нейтронов, малый размер источника и низкий фон сопутствующего гамма-излучения.

Безусловно необходимо разрабатывать схемы комплексирования ядерно-геофизических методов и приборов с целью получения дополня-

ющих друг друга данных и однозначности их интерпретации. При элементном анализе горных пород целесообразно сочетать, например, импульсный генератор нейтронов с германиево-литиевым детектором или сцинтилляционным гамма-спектрометром. Разновидность подобного комплекса уже дала возможность выделять гамма-излучение ядер кислорода и углерода. Задача расширения количества определяемых элементов и более точного определения их содержания может быть решена сочетанием импульсных нейтронных методов с рентгенометрическими, ядерно-магнитного резонанса и другими методами. Перспективным можно считать включение в комплекс ядерной геофизики методов оптического анализа с лазерными источниками возбуждения.

В дальнейшем в ядерной геофизике еще шире будут использоваться спектрометрическая и другая новая эффективная техника, применяемая в физических экспериментах, запись данных на магнитную ленту и другие носители информации, ЭВМ и малые счетные машины для оперативной интерпретации данных в полевых условиях.

Следует ожидать сочетания методов ядерной геофизики и ядерной техники. Уже получены в различных странах патенты на применение ядерного реактора, под направленным излучением которого плавятся горные породы.

Постепенно опускаясь под собственным весом, реактор создает отверстие в земной коре, подобное пробуренной скважине с оплавленными стенками вместо обсадных труб. Во время "проходки" ствола скважины сведения об элементном составе должны поступать на поверхность. При условии создания соответствующих жаропрочных материалов, необходимых для сохранения работы реактора, имеются все основания ожидать создания нового вида "бурения". Другим видом применения ядерной техники может быть использование ядерных реакций для целей повышения нефтеотдачи пластов с одновременным осуществлением контроля за происходящими изменениями состава пород по глубине.

ЛИТЕРАТУРА

Аб Э.А. Разработка портативной ускорительной нейтронной трубки универсального действия. — В кн.: Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. М., Атомиздат, 1962.

Аб Э.А., Запорожец В.М., Плотников Р.И., Хуцишвили Л.А. Некоторые вопросы конструирования скважинного генератора нейтронов. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 23. М., Гостоптехиздат, 1959.

Абезгауз Б.Л. Больше внимания охране нефтяных месторождений. — Нефть. промышленность СССР, 1941, № 3.

Абрамович М.В. Исследования буровых вод в нефтяных скважинах. — Нефть. дело, 1912, № 11.

Абрамян С.Л., Аксельрод С.М., Алексеев Ф.А. и др. Импульсный нейтрон-нейтронный метод исследования скважин и опыт применения его на Балахны-Сабунчи-Раманинском месторождении. — Азерб. нефть. хоз-во, 1960, № 11.

Аваев А.В. О связи среднего времени жизни тепловых нейтронов с нефтенасыщенностью карбонатных пород. — Бюл. НТИ. Сер. регион., развед. и промысл. геофиз., 1969, № 17.

Авдеева А.В., Владимиров В.А., Денисик Ф.П. Тепловые нейтронные параметры горных пород. — Бюл. НТИ. Сер. регион., развед. и промысл. геофиз., 1969, № 17.

Аксельрод С.М., Альтшель С.А. Устройство для радиоактивных исследований в скважинах с помощью радиоактивных изотопов. Авт. свид. № 108987, ноябрь 1953 г.

Алексин О.А. Химический анализ вод суши. М., Гидрометеиздат, 1954.

Александров С.П. Радиография Тюмукских руд. — Минеральное сырье, 1926, с. 673—696.

Алексеев Ф.А., Берзин А.К., Беспалов Д.Ф. и др. Ядерная физика в гео-

логии. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968 (Труды ВНИИЯГГ, вып. 1).

Алексеев Ф.А., Готтих Р.П., Воробьева В.Я. Закономерности в распределении радиоактивных элементов и естественного гамма-поля нефтегазоносных областей. — В кн.: Радиометрия нефтегазоносных областей. М., "Недра", 1968 (Труды ВНИИЯГГ, вып. 2).

Алексеев Ф.А., Ермаков В.И., Филонов В.А. К вопросу о содержании радиоэлементов в водах нефтяных месторождений. — Геохимия, 1958, № 7.

Алексеев Ф.А., Ерозолиимский Б.Г., Беспалов Д.Ф. и др. О результатах применения нейтронных импульсных методов и аппаратуры для исследования разреза скважин. — В кн.: Ядерная геофизика при поисках и разведке полезных ископаемых. М., "Недра", 1960.

Алексеев Ф.А., Одинокое В.П., Шимилевич Ю.С. Активационный анализ горных пород в условиях скважины и его использование для определения местоположения нефтеносных и водоносных пластов. — В кн.: Ядерная геофизика, М., Гостоптехиздат, 1959.

Алексеев Ф.А., Шацов А.Н., Готтих Р.П. Использование подводной радиометрии для изучения неотектоники и поисков структур в зоне шельфа. — В кн.: Проблема геохимических поисков нефтяных и газовых месторождений и вопросы ядерной геологии. М., "Недра", 1968.

Алексеев Ф.А., Шимилевич Ю.С. Использование метода наведенной активности для выделения нефтеносных и водоносных пластов, определения водонефтяного контакта в разрезе скважин и для элементного анализа горных пород. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Алексеев Ф.А., Шимилевич Ю.С. Импульсные нейтрон-нейтронные методы изучения геологического разреза скважин. — В кн.: Радиоактивные изотопы и излучения в народном хозяйстве СССР. Т. 4. М., Гостоптехиздат, 1961.

Алексеев Ф.А., Шимилевич Ю.С. Импульсный нейтрон-нейтронный метод. — В кн.: Труды Краковской конференции по ядерной геофизике. Краков, 1962.

Алиханян А.И., Вайсберг А.О. Искусственная радиоактивность. — Вестн. АН СССР, 1954, № 6.

Альтовский М.Е., Глева Г.А. Развитие идей В.И. Вернадского в современной гидрогеологии. — В кн.: Вопросы геохимии подземных вод (К 100-летию со дня рождения В.И. Вернадского). М., "Недра", 1969.

Андрусов И.А. К вопросу о происхождении и залегании нефти. СПб., 1908.

Анисимов В.С., Воронков Л.Н., Куриленко Ф.А. Использование генераторов нейтронов для определения интервалов притока воды в скважину. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1971.

Антипов И.А. Минералы из месторождения Тюя-Муюн в Ферганской области. — Горный журнал, 1908, № 4.

Антонов А.В., Исаков А.И., Мурин И.Д. и др. Изучение диффузии нейтронов в бериллии, графите и воде импульсным методом. — В кн.: Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). Т. 5. Физика реакторов. М., Изд-во АН СССР, 1958.

Аппаратура и методы радиоактивных измерений. — В кн.: Справочная книга геофизика-разведчика, т. 2, вып. 3. М., Гостеортехиздат, 1933.

Арбузов В.М. Возможности ИНМ при оценке насыщенности песчаных коллекторов в условиях соляного проникновения. — Труды Татар. нефт. науч.-исслед. ин-та, 1967, вып. 10.

Арбузов В.М. Оценка влияния зоны проникновения на показания импульсных нейтронных методов. — Труды Татар. нефт. науч.-исслед. ин-та. Булгульма, 1968а, вып. 12.

Арбузов В.М. Влияние зоны проникновения на показания импульсных нейтронных методов применительно к условиям Ромашкинского нефтяного месторождения. Канд. дис. М., 1968б (ВНИИЯГГ).

Арбузов В.М., Иванцов В.П. Изучение возможностей импульсных нейтронных методов для детального расчленения песчаных коллекторов по хлоросодержанию. — В кн.: Вопросы геофизических исследований в нефтяных скважинах. М., ВНИИОЭНГ, 1971.

Арутинов О.М. Двухканальная аппаратура для радиометрии скважин на одножильном кабеле образца МНИ-1952. — Труды МИНХиГП, 1955, № 15.

Архив Академии наук СССР, ф. 132, оп. 1, ед. хран. 282, л. 103–105.

Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. М., Атомиздат, 1973.

Арцыбашев С.А. Радиоактивность источников и горных пород. — В кн.: Первый Восточно-Сибирский краевой съезд. Иркутск, 1926.

Арцыбашев С.А. Теория аспирационного прибора и результаты его испытаний. — Вестн. Геол. ком. 1928, № 8.

Арцыбашев С.А., Парфианович И.А. Радиоактивность источников и минералов района Слюдянки. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1928, № 1–3.

Арцыбашев С.А., Плешанова В.Г. Прибор с замкнутым потоком воздуха для обследования минералогических коллекций на радиоактивность. — Вестн. Геол. ком., 1928, № 8.

Багашев И.А. Радиоактивность источников Забайкалья. — В кн.: Сборник в честь двадцатипятилетия научной деятельности В.И. Вернадского. М., 1914.

Баранов В.И. К теории аспирационного прибора. — Вестн. Геол. ком., 1925, № 1.

Баранов В.И. К методике измерения слаборадиоактивных веществ по альфалучам. — Вестн. Геол. ком., 1928, № 7.

Баранов В.И. К методике определения тория по эманации. — Труды Радиового ин-та, 1930, 1.

Баранов В.И. Радиометрия, М., Изд-во АН СССР, 1955.

Баранов В.И., Кириков А.П. По поводу статьи С.А. Арцыбашева "Теория аспирационного прибора и результаты его применения". — Вестн. Геол. ком., 1928, № 3.

Баранов В.И., Курбатов Л.М. К вопросу о содержании радия в нефтяных водах Ново-Грозненского района. Докл. АН СССР. Сер. А, 1931, № 7.

Баранов В.И., Курбатов Л.М. О содержании радиоэлементов в воде и ее отложениях казенной буровой скважины

№ 1 Ухтинского района. — Труды Радиового ин-та, 1933, 2.

Баранов В.И., Новицкая А.П. Радиоактивность Сунгульских торфяных грязей. — Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1943, № 3.

Баранов В.И., Цейтлин С.Г. Содержание радиоактивных элементов в некоторых почвах СССР. — Докл. АН СССР, 1941, 30, № 4.

Бабинова О.И., Холин А.И., Элланский М.М. Роль ядерно-геофизических методов при решении задач классификации и оценки параметров газонефтяных коллекторов. — Труды МИНХ и ГП, 1974, № 111.

Барсуков О.А., Авзянов В.С. Распределение нейтронов в многослойных средах при точечном источнике быстрых нейтронов. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Барсуков О.А., Авзянов В.С., Никулин А.К. Разработка методов нейтронной спектроскопии для случая реальной геометрии. Отчет. Фонды Башкир. гос. ун-та. Уфа, 1961.

Барышев В. Опыт классификации вод, притекающих к забоям буровых скважин Раманинской группы промыслов. — Азерб. нефт. хоз-во, 1928, № 3.

Барыш-Тыщенко Л.Л. Разработка нейтронного каротажа. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1946.

Басилов К. Предварительная классификация буровых вод нижнего отдела продуктивной толщи промысла им. Орджоникидзе. — Азерб. нефт. хоз-во, 1934, № 4.

Басин Я.Н. Выделение карбонатных коллекторов по данным нейтронного и электрического каротажа. Канд. дис. М., 1964 (ВНИИЯГГ).

Басин Я.Н., Куликович А.Е. Применение теории информации для выработки критерия точности определения изучаемого параметра по промыслово-геофизическим данным. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 48. М., "Недра", 1966.

Белый Г.П., Потушанский А.А., Трум А.Д. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа на нефтяных и газовых месторождениях Украины. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 19. М., "Недра", 1967.

Белый Г.П., Потушанский А.А., Трум А.Д. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа на мес-

торожениях Украины. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968.

Бергенсон Л. Радиоактивность в лечебных водах и грязях. СПб., 1914.

Берзин А.К., Грязнов В.Л., Старцев А.А., Хименков Ю.В. О возможности определения положения водонефтяного контакта гамма-нейтронным методом. — Труды ВНИИЯГГ, 1970, вып. 9.

Берзина И.Г., Флеров Г.Н., Шмилевич Ю.С. и др. О возможности выявления миграции урана и продуктов его распада в минералах. — Докл. АН СССР, 1967, 177, № 5.

Беспалов Д.Ф. Новая радиометрическая аппаратура в промысловой геологии. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Беспалов Д.Ф. Скважинные генераторы нейтронов. — Докл. совещания в рамках СЭВ по использованию методов импульсного нейтронного каротажа с применением генераторов нейтронов в геофизике и нефтедобыв. пром-сти. М., Гостоптехиздат, 1968.

Беспалов Д.Ф., Аванесов В.М., Алексеев Ф.А. и др. Устройство для импульсного нейтронного каротажа. Авт. свид. № 241557, январь 1968 г.

Беспалов Д.Ф., Войцкич Л.Р., Ерозолимский Б.Г. и др. Устройство для одновременного проведения нейтрон-нейтронного и импульсного нейтрон-нейтронного каротажа. Авт. свид. № 152918, ноябрь 1961 г.

Беспалов Д.Ф., Гель Э.П., Дядькин И.Г., Миц А.З. Скважинный нейтронный генератор с ионным источником. Авт. свид. № 167257, 1968 г.

Беспалов Д.Ф., Горбунов Г.Г., Гришаев А.И. и др. Термостойкий скважинный импульсный генератор нейтронов. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 15. М., "Недра", 1966.

Беспалов Д.Ф., Грумков А.П. Новая радиометрическая аппаратура. — Нефт. хоз-во, 1956, № 9.

Беспалов Д.Ф., Ерозолимский Б.Г. Стандартная аппаратура радиоактивного каротажа. — Нефт. хоз-во, 1955, № 9.

Беспалов Д.Ф., Ерозолимский Б.Г. Использование сцинтилляционных счетчиков в нефтяной радиометрической аппаратуре. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Беспалов Д.Ф., Ерозолимский Б.Г., Иванкин В.П. и др. Состояние и перспективы развития импульсного нейтронного исследования скважин. Препринт Международной комиссии по использованию атомной энергии. Вена, 1972.

Беспалов Д.Ф., Кривоплясов А.Н. Аппаратура ИНК для исследования механизированных скважин. — В кн.: Скважинные генераторы нейтронов. М., ВНИИЯГГ, 1973.

Беспалов Д.Ф., Миллер В.В., Шимилевич Ю.С. Импульсные нейтронные методы в геофизике. — Вестн. АН СССР, 1972, № 1.

Беспалов Д.Ф., Минц А.З., Школьников А.С. Малогабаритная нейтронная трубка типа УНГ-1. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968 (Труды ВНИИЯГГ, вып. 1).

Беспалов Д.Ф., Савосин С.И. Генераторы нейтронов для исследования скважин. — В кн.: Труды конференции ядерных геофизиков (Краков—Варшава, 1962). Варшава, 1962.

Беспалов Д.Ф., Хаустов А.И. Источник высокого напряжения 100 кВ для скважинного генератора нейтронов. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Бибинов С.А. Применение ядерных излучений для анализа вещества. Ташкент, "Фан", 1970.

Бланков Е.Б. О глубинности исследования скважин средствами ядерной геофизики. — В кн.: Ядерно-геофизические методы. Новосибирск, "Наука", 1972.

Бланков Е.Б., Бланкова Т.Н. Способ обнаружения движения пластовой или иной жидкости, содержащей активируемый нейтронами элемент. Авт. свид. № 131418, январь 1960 г.

Бланков Е.Б., Блюменцев А.М., Бланкова Т.Н. Сравнительная эффективность различных радиоактивных методов определения положения водо-нефтяного контакта в обсаженных скважинах. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 21., М., Гостоптехиздат, 1958.

Бланков Е.Б., Годин Ю.Н., Дворкин И.Л. Геофизическая разведка на нефть и газ. М., Гостоптехиздат, 1959.

Бланков Е.Б., Куриленко Ф.А. Опыт применения скважинного импульсного генератора нейтронов и метода импульсного нейтрон-нейтронного каротажа на

нефтяных месторождениях Татарии. — В кн.: Ядерная геофизика, М., "Недра", 1968.

Бланков Е.Б., Куриленко Ф.А. Опыт применения скважинного нейтронного импульсного генератора и метода нейтрон-нейтронного каротажа на нефтяных месторождениях Татарии. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968.

Бланков Е.Б., Лейпунская Д.И. и др. Перспективы использования Ас—Ве и Ро—Ве нейтронных источников в промысловой и разведочной геофизике. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968 (Труды ВНИИЯГГ, вып. 1).

Бланкова Т.Н. Определение источника обводнения действующих скважин активационным методом. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968 (Труды ВНИИЯГГ, вып. 1).

Блюменцев А.М. Способ радиометрии скважин для оценки содержания железа в горных породах. Авт. свид. № 152512, апрель 1961 г.

Богданович Е.А., Недоступ Г.А. Аппаратура для спектрометрии гамма-излучения в скважинах. — В кн.: Проблемы ядерной геофизики. М., "Недра", 1964.

Богословская Т.Н., Граммаков А.Г., Кириков А.П., Тверской П.Н. Отчет о работе Кавголовской опытно-методической партии в 1931 г. — Изв. Всесоюз. геол.-развед. объедин., 1932, 51, вып. 84.

Богоявленский Л.Н. О применении радиометрической съемки к разведке нефтяных месторождений. — Нефть и сланц. хоз-во, 1923, 4, № 2.

Богоявленский Л.Н. Способ радиометрической съемки полезных ископаемых. Авт. свид. № 4574, октябрь 1924 г.

Богоявленский Л.Н. О принципах радиометрической съемки и ее применениях. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1925а, вып. 1.

Богоявленский Л.Н. Краткий обзор радиометрических работ, выполненных Институтом прикладной геофизики летом 1924 г. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1925б, вып. 1.

Богоявленский Л.Н. О сильно проникающих излучениях земного происхождения. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1926, вып. 2.

Богоявленский Л.Н. Радиометрическая разведка нефти. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1927, вып. 3.

Богоявленский Л.Н. Ухтинское месторождение радия. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1928, 14—15.

Богоявленский Л.Н. Способ оконтуривания залежей полезных ископаемых. Авт. свид. № 12953, январь 1929 г.

Богоявленский Л.Н. О влиянии геофизических факторов на поражаемость местности молнией. — Электричество, 1931, № 5.

Богоявленский Л.Н., Ломакин А.А. Попыты с сильно проникающими излучениями земного происхождения. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1927, вып. 3.

Богоявленский Л.Н., Ломакин А.А. Аномалия проникающего излучения на Ухтинском месторождении нефти. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1928, вып. 4.

Болтышев Н.Н. Современное состояние и задачи геологического и геофизического изучения зон тектонических разрывов нефтегазоносных районов. — Труды Грознен. нефт. науч.-исслед. ин-та, 1960, вып. 8.

Бородин П.Р., Гадд М.Г. Исследования радиоактивных источников Ильменского района и озера Тургойск (Южный Урал). — Докл. АН СССР, 1935, № 4.

Бородовский В.А. Обзор в области явлений радиоактивности (на 2-м Менделеевском съезде, 1911). — ЖРФХО, 1911, вып. 1.

Бочкарев Б.Н., Жаворонков В.Я., Моляренко А.В. Предварительные данные по инструментальному нейтронно-активационному анализу пластовых вод юго-востока Западной Сибири. — В кн.: Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973.

Брагин А.А., Михайловский В.Н. Телеизмерение радиоактивных излучений. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.

Брежнев О.Н., Казакевич Г.М., Пономарчук В.А. и др. Трехсантиметровый микротрон с энергией 4 МэВ для геофизических исследований. — В кн.: Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973.

Брезгунов В.С. Закономерности распределения дейтерия в природных водах на основе данных фотонейтронного метода. Канд. дис. М., 1967 (ВНИИЯГГ).

Бретон Д. Проверка материалов методом котлового осциллятора на Шатильонском реакторе. — В кн.: Материалы

международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). М., Изд-во АН СССР, 1958.

Бронштейн К.Г. Наблюдения над проникающей радиацией на Крайнем Севере. — Труды Радиового ин-та, 1933, 2.

Булашевич Ю.П. Применение радиоактивного метода для поисков пегматитов в полосе щелочных пород Урала. — Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1941, № 3.

Булашевич Ю.П. Теория нейтронного каротажа в применении к разведке нефтяных и угольных месторождений. — Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1948, № 2.

Булашевич Ю.П. К теории нейтронного каротажа. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1951, 1, № 3.

Булашевич Ю.П. Развитие ядерно-геофизических исследований в Уральском филиале АН СССР. — В кн.: Состояние и перспективы развития геофизических методов на Урале. Свердловск, 1971.

Булашевич Ю.П., Воскобойников Г.М. Гамма-гамма каротаж на угольных месторождениях Урала и возможности бескернового бурения части углеразведочных скважин. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 1.

Буров Б.М., Денисюк Ф.Ц., Одинокоев В.П. и др. Вопросы интерпретации данных импульсного нейтронного каротажа. — В кн.: Состояние и перспективы ядерно-физических методов поисков и разведки полезных ископаемых. М., "Недра", 1969.

Вавилов С.И. Ленин и современная физика. — Вестн. АН СССР, 1944, № 3.

Вайсберг А.С. Определение содержания дейтерия в нефти и сопутствующих ей водах месторождения Долина и Битко в Станиславской области. — Докл. Ужгород. ун-та. Сер. физ.-мат. наук, 1960, № 3.

Варварин Г.Б., Филиппов Е.М. Плотностный гамма-гамма-метод в геофизике. Новосибирск, "Наука", 1972.

Варенцов М.И., Ильина Т.Д., Трещин Ф.А. Академик И.М. Губкин и современное значение его научного наследия. — Нефт. хоз-во, 1971, № 9.

Вахтин Б.С., Иванов В.С., Новоселов А.В. Возможности применения радиационно-резонансных детекторов нейтронов при исследовании скважин. — В кн.: Применение ядерных излучений

в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973.

Вахтин Б.С., Иванов В.С., Семёнов В.И., Филиппов Е.М. К вопросу о количественной интерпретации данных ННК-р с использованием ЭВМ. — В кн.: Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973.

Вебер В. Полезные ископаемые Туркестана. СПб., 1913.

Ведехин А.Ф. Детектор медленных нейтронов для работы в средах с высокой температурой. — В кн.: Геофизическая аппаратура, № 31. М., "Недра", 1966.

Ведехин А.Ф. Разработка детекторов медленных нейтронов для аппаратуры радиоактивного каротажа и изучения возможностей получения плато в счетных характеристиках сцинтилляционных счетчиков. Канд. дис. М., 1967 (ВНИИЯГ).

Вериго А.Б. Определение по альфа-лучам радиоактивного вещества в смеси с нерадиоактивным. — Изв. АН СССР. Сер. VII, 1929, № 5.

Вернадский В.И. Задачи дня в области радия. — Изв. АН, 1911, 5, № 1.

Вернадский В.И. Записка о принятии безотлагательных мер для проведения исследований радиоактивных руд России. — Изв. АН, 1913а, 6, № 17.

Вернадский В.И. О радиевых лучах в России. — Газ. "Русские ведомости", 1913б, 20 октября.

Вернадский В.И. Что нужно сейчас для исследования радиевых месторождений в России? — Газ. "Русские ведомости", 1913в, 30 ноября.

Вернадский В.И. Краткий отчет об исследованиях радиоактивных месторождений. — Изв. АН, 1914а, 6, № 18.

Вернадский В.И. Об экспедициях, проведенных летом 1914 г. — Изв. АН, 1914б, 6, № 7.

Вернадский В.И. О необходимости исследования радиоактивных минералов в Российской империи. — Труды Радиевой комиссии АН, № 1, Пг., 1914в.

Вернадский В.И. О капиллярной воде горных пород и минералов. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1929, № 15.

Вернадский В.И. К вопросу о радиоактивности нефтяных буровых вод. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1930, № 15.

Вернадский В.И. Пластовые воды биосферы и стратисферы (доклад на I Всесоюзном гидрологическом съезде,

1931 г.). — В кн.: Соц. реконструкция и наука. М., 1932, вып. 1.

Вернадский В.И. О некоторых очередных проблемах радиогеологии. — Изв. АН СССР, 1935, № 1.

Вернадский В.И. О значении радиогеологии для современной геологии. — Труды XVII сессии Международного геологического конгресса. Т. 1. М., Гостехиздат, 1939.

Вернадский В.И. Очерки геохимии. Очерк 6-й. Радиоактивные элементы рядов урана, тория, актиноурана. — Избр. соч., т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1954.

Вернадский В.И. История природных вод. — Избр. соч., т. IV, кн. 2. М., Изд-во АН СССР, 1960.

Вернадский В.И., Хлопин В.Г. Об исследованиях на радий нефтяных месторождений Союза. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1932, № 3.

Вернов С.Н. Продолжительность и характер разряда в счетчиках Гейгера-Мюллера. — Труды Радиевого ин-та, 1933, 2.

Вернов С.Н. Исследования космического излучения. — Phys. Rev., 1934, 46, p. 822.

Войцук Л.Р. Малогабаритная газонаполненная импульсная нейтронная трубка с удвоением ускоряющего напряжения. Канд. дис. М., 1964 (ВНИИЯГ).

Войцук Л.Р. Отпаянные ионные ускорительные трубки. — В кн.: Импульсный нейтронный каротаж, вопросы методики исследования. М., "Недра", 1968.

Войцук Л.Р., Ерозолимский Б.Г. Лабораторный генератор нейтронов. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Войцук Л.Р., Ерозолимский Б.Г. Малогабаритная отпаянная импульсная нейтронная трубка. — В кн.: Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. М., Атомиздат, 1962.

Войшилло Г.В. Разработка источника высокого напряжения для скважинного генератора нейтронов. Отчет. Фонды ЛЭИС. Л., 1957.

Воскобойников Г.М., Деев Л.О. Плотностный каротаж углегазоземных скважин. — Разведка и охрана недр, 1957, № 3.

Воскобойников Г.М. Теоретические основы селективного гамма-каротажа. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 3.

Выборных С.Ф. Применение радиоактивных изотопов в добыче нефти и

бурении скважин. М., Гостоптехиздат. 1957.

Выборных С.Н., Глазов Е.Ф., Комаров С.Г. и др. Применение радиоактивных методов исследования нефтяных и газовых скважин. Отчет. Фонды ВНИИ-Геофизики. М., 1953.

Гаврилов Я.В. О геофизических методах разведки. — Азерб. нефт. хоз-во, 1926, № 1.

Гаврусевич Б.А., Метелкин П.В. О распространении редкоземельных и радиоактивных элементов в Прибайкалье. — В кн.: Академику В.И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности. М., Изд-во АН СССР, 1936.

Галлай М.М. Доклад о работе таможенной комиссии. — Труды Бакин. отд. Рус. техн. о-ва за 1902 г., 1903, вып. 8.

Галонский П.П. Итоги Международной Женевской конференции по использованию атомной энергии в мирных целях и задачи нефтяной промышленности СССР в этой области. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Гамбарян Р.Г., Штань А.С. Нейтронно-резонансный анализ элементного состава вещества. — Атомная энергия, 1968, № 2.

Ган О., Борн Г. Объяснение факта повышенного содержания гелия в некоторых не содержащих урана и тория минералах. — В кн.: Академику В.И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности. М., Изд-во АН СССР, 1936.

Ганшин С.М. Центральная задача нефтяной промышленности на 1932 г. (по Постановлению ЦК ВКП(б)). — Нефт. хоз-во, 1931, № 10–11.

Гедовиус А.К. Геофизические методы поисков и разведок полезных ископаемых. — Изв. Геол. ком., 1927, 44, № 1–3.

Герасимов В.Г. Подземные воды центральной части Волго-Камского края и их роль в формировании нефтяных залежей. Автореф. докт. дис. М., 1968, (ИГИРГИ).

Герлинг Э.К. К вопросу о гелиевомдыхании земли. — Докл. АН СССР, 1935, № 4.

Гиматулинов Ш.К. О механизме моющего действия вод различного состава при вытеснении нефти из пористой среды. — Нефт. хоз-во, 1962, № 10.

Глазов Е.Ф., Ильина Т.Д. Разработка термостойкого глубинного прибора радиоактивного каротажа с полониево-бериллиевым источником. Отчет. Фонды ВНИИКАнефтегаз. М., 1961.

Глауберман А.Е., Тальянский И.И. О распределении нейтронов в средах с заданными свойствами при цилиндрической границе раздела. — Атомная энергия, 1957, № 7.

Глауберман А.Е., Тальянский И.И. Распределение нейтронов в скважинах после включения источника. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Говор Л.И., Демидов А.М., Иванов В.А. Исследование возможностей каротажа нефтяных скважин с использованием гелий-литиевого гамма-детектора и Ро-Ве источника нейтронов. Препринт ИАЭ–1872. М., 1969.

Голубятников Д.В. Годовой отчет Геологического комитета. — Изв. Геол. ком., 1912, 31.

Голубятников Д.В. О составе пластовых вод в районах Сураханы и Биби-Эйбата. — Изв. Геол. ком., 1914, 33; 1915, 34.

Голубятников Д.В. Буровые воды Биби-Эйбата. — Труды Геол. ком. Новая сер., 1916, вып. 141.

Горбунов В.Ф., Кадисов Е.М., Кедоров А.И. Спектрометрия нейтронного гамма-излучения в сочетании с временным анализом и перспективы ее применения в ядерной геофизике. — В кн.: Состояние и перспективы ядерно-геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых. М., "Недра", 1969.

Горбунов В.Ф., Спасский А.Б., Иванкин В.П. Об определении коэффициента поглощения гамма-квантов в однородной среде импульсными нейтронными методами. — В кн.: Выделение продуктивных пластов методами ядерной геофизики в обсаженных скважинах. Саратов, НВ НИИГГ, 1971.

Горбушина Л.В., Зимин Д.Ф., Сердюкова А.С. и др. Радиометрические и ядерно-физические методы поисков и разведки полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1970.

Горшков Г.В. Счетчик Гейгера–Мюллера и его применение в геологоразведочном деле. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики, 1944.

Горшков Г.В. Проникающее излучение радиоактивных источников. Л., "Наука", 1967.

Горшков Г.В., Граммаков А.Г., Старик И.Е., Шпак В.А. Некоторые данные о физических основах радиоактивных геофизических методов разведки. — Труды XVII сессии Междунар. геологич. конгресса, т. 4. М., Госгеотехиздат, 1940.

Горшков Г.В., Зябкин В.А. Образование нейтронов под действием космического излучения на различных глубинах под землей. — Атомная энергия, 1973, № 3.

Горшков Г.В., Курбатов Л.М. Опыт определения геологического строения пластов по интенсивности гамма-излучения в буровых скважинах. — Журнал геофизики, 1937, 7, № 1.

Горшков Г.В., Лятковская Н.М. К вопросу об измерении интенсивности гамма-излучения горных пород, закрытых наносами. — Журнал геофизики, 1934, 4, № 1.

Горшков Г.В., Лятковская Н.М. О нейтронном излучении горных пород. — Докл. АН СССР, 1939, 25, № 9.

Горшков Г.В., Лятковская Н.М. Нейтронный каротаж. — Вестн. Ленингр. ун-та, 1946, № 2.

Горшков Г.В., Цветков О.С. О пространственном распределении нейтронов космического излучения вблизи поверхности раздела атмосфера-Земля. — Атомная энергия, 1969, № 4.

Граммаков А.Г. Полевые радиометрические измерения на универсальном приборе. М.-Л., 1930.

Граммаков А.Г. О влиянии некоторых факторов на распространение радиоактивных emanаций в природных условиях. — Журнал геофизики, 1936, 6, № 2-3.

Граммаков А.Г., Лятковская Н.М. О диффузии радиоактивных emanаций в горных породах. — Журнал геофизики, 1935, 5, № 3.

Гречухин В.В. Геофизические методы исследования угольных скважин. М., "Недра", 1965.

Губерман Ш.А. О спектроскопии гамма-излучения естественных и искусственных радиоактивных изотопов в условиях скважины. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Губерман Ш.А. Теория подобия и радиометрия скважин. М., Гостоптехиздат, 1962.

Губерман Ш.А., Кожевников Д.А. Восстановление истинных законов изменения полей по интегральным характеристикам. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1962, № 7.

Гомонай В.И. О разграничении нефтеносных и водоносных пластов посредством использования электронных и фотонных пучков. — Атомная энергия, 1960, 9, № 4.

Гомонай В.И. Выяснение возможностей использования некоторых фотоядерных реакций для отделения нефтеносных пластов от водоносных. — В кн.: Электронные ускорители. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1961.

Губкин И.М. Об обводнении нефтяных месторождений Бакинского и Грозненского промыслов. — Нефть и сланц. хоз-во, 1922, № 7-8.

Губкин И.М. Учение о нефти. М.-Л., ОНТИ НКТП, 1932.

Гудмен К. Научные и технические основы ядерной энергетики. М., ИЛ, 1948.

Гулин Ю.А. Дальнейшая разработка методики измерения и интерпретация диаграмм РК на месторождениях Башкирии. Отчет. Фонды Башкир. геофиз. треста. Уфа, 1954.

Гулин Ю.А. Некоторые вопросы радиометрии. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Гулин Ю.А. Количественная интерпретация данных радиометрии скважин. — В кн.: Труды Всесоюзной конференции по применению изотопов и ядерных излучений. М., Гостоптехиздат, 1958.

Гулин Ю.А. Эффективность определения пористости песчано-глинистых отложений по результатам гамма-гамма и нейтронного каротажа в комплексе с ГК и ПС. — В кн.: Нефтегазовая геология и геофизика, № 9. М., ВНИИОЭНГ, 1968.

Гулин Ю.А. Влияние условий измерений при оценке пористости пород по данным нейтронного гамма-метода. — В кн.: Ядерная геофизика, вып. 7. М., "Недра", 1969.

Гулин Ю.А., Бернштейн Д.А., Иванов В.И. Влияние ближней зоны на результаты исследований обсаженных скважин старого фонда. — В кн.: Ядерно-физические и акустические методы вы-

деления продуктивных пластов в обсаженных скважинах". М., "Недра", 1972.

Гулин Ю.А., Понатов Г.И. Результаты математического моделирования гамма-гамма каротажа для условий нефтяных скважин. — В кн.: Ядерная геофизика, вып. 7. М., "Недра", 1969.

Даневич В.И. Исследование и принципы построения измерительных устройств ядерно-магнитного каротажа. Канд. дис. Баку, 1963 (Азерб. ин-т нефтехим. промышленности).

Дахнов В.Н. Результаты работ Московского нефтяного института по созданию и промышленному внедрению радиоактивных методов отбивки нефти от воды в пластах. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., Гостоптехиздат, 1962.

Дахнов В.И. Использование фактора времени при интерпретации результатов исследования скважин. — В кн.: Промысловая геофизика, вып. 48. М., Гостоптехиздат, 1963.

Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., "Недра", 1972.

Дахнов В.Н., Долина Л.П. Геофизические методы изучения нефтегазовых коллекторов. М., Гостоптехиздат, 1959.

Дахнов В.Н., Коржев А.А., Печерников В.Ф., Морозов Г.С. Способ определения мест перфорации при вскрытии нефтяных пластов. Авт. свид. № 70227, январь 1943 г.

Дахнов В.Н., Панченков Г.М., Холин А.И. и др. Способ выделения нефтеносных пластов путем закачки мылонафта с примесью радиоактивного вещества. Авт. свид. № 104984, август 1954 г.

Дахнов В.Н., Холин А.И., Барсуков О.А. Расчленение коллекторов по водонефтенасыщенности в обсаженных скважинах нейтронным гамма-методом. — Нефт. хоз-во, 1955, № 8.

Дваркин И.Л., Резванов Р.А. Использование сцинтилляционных счетчиков для счета медленных нейтронов в нефтяных скважинах — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Дебранд Р. Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин. М., "Недра", 1972.

Денисюк С.А., Дядькин И.Г. и др. К теории нейтронного каротажа. — В кн.: Труды конференции ядерных геофизиков (Краков, 1962). Варшава, 1962.

Деятельность Главной палаты мер и весов в 1923 г. — В кн.: Второе годовое собрание Главной палаты мер и весов. Л., 1924.

Дорош М.М., Костю Я.Э., Шкода-Ульянов В.А. и др. Способ разграничения нефтеносных пластов от водоносных, основанный на регистрации запаздывающих нейтронов. — Атомная энергия, 1968, № 1.

Дядькин И.Г. К теории гамма-каротажа буровых скважин. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1955, № 4.

Дядькин И.Г., Баталина Э.П. Изменение во времени пространственно-энергетического распределения нейтронов от импульсного источника. — Атомная энергия, 1961, 10, вып. 1.

Дядькин И.Г., Понатов Г.И. К теории и методике математического моделирования распределения гамма-квантов. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1966, № 1.

Дядькин И.Г., Стариков В.Н., Еникеева Ф.Х. Решение задач теории нейтронного гамма-каротажа методом Монте-Карло. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1969, № 5.

Егоров К. О находке радиоактивных минералов на Байкале. — Изв. АН, 1912, № 8.

Егоров К. О находке радиоактивных минералов на Байкале. — Изв. АН, 1914, № 1.

Ерозолимский Б.Г., Бондаренко Л.Н., Войчик Л.Р. и др. Малогабаритная запаянная нейтронная трубка. Отчет. Фонды ИГИРГИ. М., 1958.

Ерозолимский Б.Г., Войчик Л.Р., Бондаренко Л.Н. и др. Малогабаритная отпаянная нейтронная трубка. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Ерозолимский Б.Г., Войчик Л.Р., Попов А.В. и др. Новые методы исследования буровых скважин, основанные на использовании импульсных нейтронных источников. — Нефт. хоз-во, 1958, № 11.

Ерозолимский Б.Г., Школьников А.С., Исаков А.И. Применение импульс-

ного нейтронного источника для исследований в нефтяных скважинах. — Атомная энергия, 1960, 9, № 2.

Ерозолимский Б.Г., Школьников А.С. Метод разделения водонефтенасыщенных пластов, основанный на применении импульсного нейтронного источника. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.

Ерчиковский Г.О. Полевой гамма-электроскоп и его применение для поисков радиоактивных руд. — В кн.: Труды по изучению радия и радиоактивных руд, т. 3. Л., Изд-во АН СССР, 1928.

Жувагин М.Г., Акчасьянов Ю.А. Новый способ контроля результатов гидравлического разрыва пласта при помощи радиоактивных изотопов. — Нефть. хоз-во, 1960, № 6.

Жувагин И.Г., Бродский П.А., Гулин Ю.А. и др. Геофизические исследования нефтяных эксплуатационных скважин. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 31. М., "Недра", 1969.

Журнал присутствия Геологического комитета. — Изв. Геол. ком. за 1920 г., 1924., т. 39, № 7—10.

Журнал присутствия Геологического комитета. — Изв. Геол. ком. за 1922 г., 1926, т. 41, № 6—9.

Заборовский А.И. Элементы геофизических методов разведки. Прилож. № 2. — В кн.: Акад. И.М. Губкин "Учение о нефти". М, НКТП, 1932.

Заборовский А.И. Нейтронный каротаж обсаженных скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1942.

Зайцева Л.Л., Фигуровский Н.А. Исследования явлений радиоактивности в дореволюционной России. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Зак С.Л. Погребенная вода и ее значение для нефтедобычи. — Нефть. хоз-во, 1947, № 4.

Закон о предоставлении Академии наук 169500 рублей на исследование радиоактивных месторождений России. ЦГИАЛ, ф. 733, оп. 145, ед. хран. 260, л. 297.

Записки Минералогического общества. Сер. 2, 1900, ч. 38, вып. 2, 4.

Записки Минералогического общества. Сер. 2, 1908, ч. 46, вып. 1.

Записки Минералогического общества. Сер. 2, 1909, ч. 47, вып. 1.

Запорожец В.М. Вопросы исследования горных пород методом активации кислорода быстрыми нейтронами. — В

кн.: Новое в методике и технике промыслово-геофизических исследований на нефть и газ. М., ЦНИИТЭнефть, 1963.

Запорожец В.М. Методы каротажа нефтяных и газовых скважин с использованием ускорителей заряженных частиц. Докт. дис. М., 1967 (ВНИИГТ).

Запорожец В.М., Кантор С.А. Импульсный нейтронный каротаж. — Изв. Томск. политехн. ин-та, 1959, 96, № 1.

Запорожец В.М., Кантор В.М., Сулин В.В., Филиппов Е.М. Способ электронного каротажа скважин. Авт. свид. № 111864, декабрь 1956 г.

Запорожец В.М., Кедров А.И. Кислородный каротаж. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1967.

Запорожец В.М., Кедров А.И. Исследование горных пород методом активации ядер кислорода нейтронами с энергией 14 МэВ. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968.

Запорожец В.М., Кедров А.И., Сулин В.В. Разработка ускорителей заряженных частиц для исследования скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1959.

Запорожец В.М., Rogov Б.И. и др. Усовершенствование аппаратуры радиоактивного каротажа. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики, 1954.

Запорожец В.М., Rogov Б.И. Разработка новых типов аппаратуры радиоактивного каротажа. — В кн.: Приборы для геофизических исследований скважин радиоактивными методами. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.

Запорожец В.М., Сулин В.В. Гамма-нейтронный каротаж. — Изв. Томск. политехн. ин-та, 1959а, 96, № 1.

Запорожец В.М., Сулин В.В. Некоторые результаты, полученные при исследовании скважин аппаратурой РК с сцинтилляционными счетчиками. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 29. М., Гостоптехиздат, 1959б.

Запорожец В.М., Сулин В.В. Первый опыт применения скважинного генератора нейтронов при радиоактивном каротаже. — В кн.: Прикладная геофизика, № 28. М., Гостоптехиздат, 1960.

Запорожец В.М., Сулин В.В. Возможности применения ускорителей заряженных частиц в нефтяной и рудной геофизике. — В кн.: Электронные ускорители. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1961.

Запорожец В.М., Филиппов Е.М. Использование ускорителей заряженных частиц при исследовании методами радиоактивного каротажа. — В кн.: Прикладная геофизика, № 20. М., Гостоптехиздат, 1958.

Запорожец В.М., Школьников А.С., Вайнберг Ю.Б. Усовершенствование и разработка новых типов аппаратуры радиоактивного каротажа. Отчет. Фонды ВНИИ Геофизики, 1956.

Захарченко В.Ф. Некоторые вопросы теории нейтронного каротажа с применением импульсного генератора нейтронов. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1961, № 6.

Захарченко В.Ф. Влияние переноса на временное распределение замедляющихся нейтронов и импульсный нейтронный каротаж. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1962, № 10.

Захарченко В.Ф. Распределение тепловых нейтронов с учетом замедления применительно к импульсной нейтронметрии в геофизике. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1963, № 10.

Захарченко В.Ф. К методике интерпретации нейтронных измерений в средах с включениями. — В кн.: Ядерно-геофизические исследования. Свердловск-Уфа, 1967 (Геофиз. сб., № 6).

Золотов А.В. Применение солей калия в качестве эталонного радиоактивного источника. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 30. М., Гостоптехиздат, 1959.

Иванкин В.П. Усовершенствование методики и интерпретации радиоактивного каротажа в геологических условиях Саратовского Поволжья. Отчет. Фонды Нижневолжского геофиз. треста. Саратов, 1955.

Иванкин В.П. Способ радиометрии скважин с регистрацией вторичного гамма-излучения. Авт. свид. № 113856, май 1957 г.

Иванкин В.П. Использование нейтронных методов исследования скважин для оценки пористости пород. — В кн.: Промысловая геология и геофизика. Саратов, Изд-во Саратов. ун-та, 1966.

Иванкин В.П., Кантор С.А., Миллер В.В. Современное состояние вопроса о количественном определении нейтронных параметров горных пород импульсными нейтронными методами. — В кн.: Состояние и перспективы ядерно-геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых. М., "Недра", 1969.

Игнарович П.К. О закономерности распределения и формирования подземных вод. — Докл. АН СССР, 1944, № 3.

Игумнов С.А. Об использовании запаздывающих нейтронов для бескаротажного определения содержания урана в скважинах. — Изв. вузов. Горн. журнал, 1966, № 2.

Ильина Т.Д. Согласование ИННК по глубине при автоматической комплексной интерпретации каротажных данных. — Бюл. НТИ, ВИЭМС, 1962а, № 8.

Ильина Т.Д. Способ автоматической обработки результатов геофизических исследований скважин при комплексной интерпретации с помощью ЭВМ. Авт. свид. № 162071, октябрь 1962 г.

Ильина Т.Д. Некоторые практические приложения учения о радиоактивности к поискам полезных ископаемых в СССР. — В кн.: Учение о радиоактивности (история и современность). М., "Наука", 1973.

Ильина Т.Д. Академия наук и нефтяная промышленность (к 250-летию АН СССР). — Нефть. хоз-во, 1974, № 5.

Ильина Т.Д., Комаров С.Г., Куликович А.Е., Сохранов Н.Н. Состояние и перспективы развития интерпретации геофизических исследований скважин при помощи вычислительных машин. — Сов. геол., 1963, № 5.

Итенберг С.С. Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1961.

Каисов Е.М., Миллер В.В., Шимилевич Ю.С. Применение германиево-литиевых спектрометров для нейтронного активационного анализа горных пород. — В кн.: Ядерно-физические и акустические методы исследования обсаженных скважин при доразведке нефтяных и газовых месторождений. М., ВНИИГТ, 1973.

Казакевич Г.М., Пономарчук В.А., Филиппов Е.М. О возможности определения азота в моделях нефтяных пластов по гамма-излучению радиационного захвата нейтронов. — В кн.: Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973.

Калам каров В.А., Мингареев Р.Ш., Требин Ф.А. Прогресс в области разработки нефтяных и газовых месторождений и эксплуатации скважин. — Нефть. хоз-во, 1967, № 10.

Калицкий К.П. По поводу статьи Л.Н. Богоявленского "О применении радиометрической съемки к разведке

нефтяных месторождений". — Нефт. и сланц. хоз-во, 1923, 4, № 2.

Канлыбаева Ж.М., Жукова С.Г., Клиновицкий Ф.И., Сарсембаев А.А. Некоторые результаты наблюдений за движением горных пород в толще массива с помощью радиоактивных изотопов. — Труды ИГД АН КазССР, 1962, 9.

Кантор С.А. Основы теории нейтронного каротажа. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 13. М., Гостоптехиздат, 1955.

Кантор С.А. Глубинность исследования горных пород импульсным нейтронным каротажем с источником тепловых нейтронов. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 29. М., Гостоптехиздат, 1961.

Кантор С.А. Глубинность исследования горных пород импульсным нейтронным каротажем с источником быстрых нейтронов. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Кантор С.А., Суслов В.Г., Школьников А.С. Лабораторные исследования возможностей гамма-спектрометрии в скважинах при проведении измерений методом наведенной активности. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Карасев М.С. Процессы образования нефти и формирования залежей нефти и подземных вод нефтеносных районов. — Нефт. хоз-во, 1952, № 7.

Карпинский А.П. Об исследованиях Рамзая над эманацией радия. — Зап. Минералог. о-ва, 1905, 42, вып. 2 (протоколы).

Карпов Б.Г. Жизнь И.А. Антипова. — Горный журнал, 1913, 2, № 6.

Карус Е.В. Ядерная геофизика в решении современных геологических задач. — Вестн. АН СССР, 1972, № 1.

Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. М., Гостоптехиздат, 1963.

Кедров А.И. Определения содержания серы в пласте методом активационного каротажа. — В кн.: Геология месторождений самородной серы. М., "Наука", 1969.

Кильдеева Ф.Ф. О применении импульсного нейтрон-нейтронного метода на нефтяных промыслах Татарии. — Геология нефти и газа, 1964, № 2.

Кириков А.П., Богословская Т.Н., Горшков Г.В. Эманирующая способ-

ность руд и горных пород Табошарского урано-радиевого месторождения. — Изв. Всесоюз. геологоразвед. объединения, 1932, 61, вып. 84.

Кириков А.П., Тверской П.Н., Горшков Г.В. и др. Радиоактивные геофизические методы в приложении к геологии. Л., Гостеонефтеиздат, 1934.

Кириков А.П., Тверской П.Н., Грамаков А.Г. К вопросу об эманационном методе поисков радиоактивных объектов. — Изв. Всесоюз. геологоразвед. объединения, 1932, 61, вып. 84.

Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред (теория метода гамма-спектрометрии и геолого-геофизические приложения). М., Атомиздат, 1969.

Кожевников Д.А. Исследования пространственно-энергетического распределения нейтронов в среде с высоким водородосодержанием. — Труды МИНХиГП, 1959, № 25.

Кожевников Д.А. К расчету длины замедления нейтронов в средах с высоким содержанием водорода. — Труды МИНХиГП, 1960, № 31.

Кожевников Д.А. О замедлении нейтронов в поглощающей среде. — Атомная энергия, 1968, № 2.

Кожевников Д.А. Изучение закономерностей распределения нейтронов в горных породах. — В кн.: Геология, геофизика, разработка нефтяных и газовых месторождений. М., "Недра", 1969.

Кожевников Д.А. Нейтронные характеристики горных пород и их использование в нефтепромысловой геологии. М., "Недра", 1974.

Кожевников Д.А., Мархасин В.И., Марьенко Н.Н. Влияние параметров ближней зоны на показания стационарных нейтронных методов. — В кн.: Нефтегазовая геология и геофизика, № 10, М., ВИЭМС, 1971.

Кожевников Д.А., Хавкин В.С. Замедление резонансных нейтронов в веществе. — Атомная энергия, 1970, № 5.

Козин К.П., Дахнов В.Н., Морозов Г.С. и др. Способ активизирования бурового раствора или цемента радиоактивными веществами. Авт. свид. № 66351, июнь 1941 г.

Кокшаров Н.И. Материалы для минералогии в России. Т. 4. СПб., 1862.

Колчина А.Г., Устинов Е.П. и др. Методические указания по применению

радиометрических методов для поисков и разведки руд нерадиоактивных элементов и геологического картирования, вып. 1. М., Гостеолиздат, 1963.

Комаров С.Г. Геофизические методы исследования нефтяных скважин. М., Гостоптехиздат, 1952.

Комаров С.Г. Техника промысловой геофизики, 2-е изд. М., Гостоптехиздат, 1957.

Комаров С.Г., Берман Л.Б., Нейман В.С. Способ контроля за продвижением пластовых вод в нефтяных залежах методами промысловой геофизики. Авт. свид. № 252245, март 1968 г.

Комаров С.Г., Запорожец В.М. Основные задачи в области радиоактивного каротажа. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Комлев Л.В. К вопросу о содержании радия в нефтяных водах Новогрозненского района. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1931, № 7.

Комлев Л.В. К вопросу о происхождении радия в пластовых водах нефтяных месторождений. — Труды Радиового ин-та, 1933, 2.

Комлев Л.В., Мятелкин П., Савченко В.П. Радиометрические обследования пластовых нефтяных месторождений Дагестана, Кубани и Азербайджана. — Труды Радиового ин-та, 1933, 2.

Комлев Л.В., Чердынцев В.В. Продукты распада тория в радиеносных водах Южного Дагестана. — Труды Радиового ин-та, 1933, 3.

Коноплев Ю.В. Разработка методики ядерно-геофизических исследований с целью определения параметров выработки пластов. Канд. дис. М., 1969 (ВНИЯГГ).

Коноплев Ю.В., Киценко Ю.А. Разработка методики проведения ИННК и ИНГК в условиях нефтяных месторождений Кавказа. Отчет. Фонды ВНИИГ геофизики. М., 1964.

Коноплев Ю.В., Покидько Л.П. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа в условиях низкой минерализации пластовых вод. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 45. М., "Недра", 1965.

Контроль коррозии промыслового оборудования. М., ВНИИОЭНГ, 1971.

Коржев А.А. Способ гамма-каротажа. Авт. свид. № 73265, август 1945 г.

Коржев А.А. Устройство для гамма-каротажа. Авт. свид. № 73221, май 1946 г.

Коржев А.А. Усовершенствование и внедрение в производство и интерпретация результатов гамма-каротажа. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1949.

Коржев А.А., Рогов Б.И., Говоров Н.Н. Устройство для радиоактивного каротажа скважин с источником нейтронов. Авт. свид. № 98206, февраль 1952 г.

Кошляк В.А. Применение импульсного нейтрон-нейтронного метода (ИННМ) при контроле разработки нефтяных месторождений. — Геол. нефти и газа, 1968, № 7.

Кремс А.Я. О характере грунтовых вод, встречающихся при бурении скважин на Балаханской промысловой группе. — Азерб. нефт. хоз-во, 1928, № 4 (76).

Кремс А.Я. Каротаж скважин и его значение для геологии. Баку, Техиздат, 1932.

Кремс А.Я. Организовать по-новому геолого-поисковые и разведочные работы на нефть. — Нефт. хоз-во, 1937, № 4—5.

Кризоплясов А.М., Воронков Л.Н., Крупников П.Н. Генератор нейтронов для исследования фонтанирующих скважин. — Тезисы докл. Всесоюз. семинара по ядерной геофизике. Уфа, Башкир. гос. ун-т, 1969.

Кропотов О.Н., Кропотова М.М. Комплексование методов ядерной геофизики при изучении газонасыщенных коллекторов Ферганской долины. — Труды МИНХиГП, 1974, № 111.

Крыжановский Л.И., Лабунцев А.Н. Отчет по командировке на Алтай в 1921 г. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1926, № 4.

Кузнецов С.Д. О находке радиоактивных минералов в Сибири. — Изв. АН, 1912, № 6.

Курбатов Л.М. О радиоконтактном месторождении типа "Юлия". — Изв. Сиб. отд. Геол. ком. 1922, 2, вып. 6.

Курбатов Л.М. Радиоактивность источников и буровых вод Нефте-Дага и Челекена. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1931, № 7.

Курбатов Л.М. Прибор для определения в буровых скважинах характера, мощности, состояния пластов и границ раздела между ними по гамма-излучениям радиоактивных элементов. Авт. свид. № 39279, январь 1934 г.

Курбатов Л.М., Бруновский Б. Исследовательские работы в радиевой промышленности СССР за 1924 год. — Природа, 1925, №1—3.

Куриленко Ф.А., Хуснуллин М.Х. Разработка методики измерений импульсными методами на месторождениях Татарии. Отчет. Фонды Татнефтегеофизики. Бугульма, 1967.

Курнаков Н.С., Жемчужный С.Ф. О метаморфизации соляных рассолов. — Отчет комиссии по изучению производительных сил России, № 9, Пг., 1917.

Курнаков Н.С., Опыхтина М.Н. О явлениях растворимости в системе хлористый натрий—серомагнетевая соль. — Изв. Ин-та физ.-хим. анализа. 1927, 3.

Кухаренко Н.К., Сердид А.Г., Одинокое В.П. Выделение водоносных и нефтеносных пластов и определение положения водонефтяного контакта в условиях обсаженной скважины методами НГК-ЛС и ННК. — В кн.: Применение радиоактивных излучений и изотопов в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Кухтевич В.И. Прохождение рассеянного гамма-излучения в воде. — Атомная энергия, 1958, 4, № 2.

Лабунцев А.Н. К минералогии Советской Карелии. — Изв. АН СССР. Сер. VI, 1927, № 7—8.

Лантев В.В. Разработка методики интерпретации данных ИННК для разделения нефтеносных и водоносных карбонатных коллекторов. Канд. дис. М., 1967 (ВНИИЯГГ).

Лантев В.В., Цлав Л.З. Возможность исследования ИННК для изучения нефтеводонасыщенности карбонатных коллекторов. — Труды Куйбышев. НИИ НП, 1965, вып. 31.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н., Ерозоли-ский Б.Г. и др. Радиоактивный каротаж скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1949.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н., Ерозоли-ский Б.Г. и др. Усовершенствование и внедрение радиоактивного каротажа скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1950.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н., Полак Л.С. Нейтронный метод определения нефте-насыщенности. Отчет ВНИИГеофизики. М., 1947а.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н., Полак Л.С. Нейтронный каротаж скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1947б.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н., Полак Л.С. и др. Нейтронный каротаж скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1948а.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н., Полак Л.С. и др. Нейтронный способ определения водородонасыщенности. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1948б.

Лапук Б.Б., Флеров Г.Н. и др. Усовершенствование и внедрение методики радиоактивного каротажа скважин. Отчет. Фонды ВНИИГеофизики. М., 1952.

Ларионов В.В. Ядерная геология и геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Ларионов В.В. Радиометрия скважин. М., "Недра", 1969.

Лаубенбах А.И., Скосырева Л.Н. Особенности распределения естественного гамма-поля в пределах Западно-Туркменской нефтегазоносной области. — Труды ВНИИЯГГ, 1968, вып. 1.

Лейпунская Д.И. Нейтронный активационный анализ образцов горных пород. — Труды ВНИИЯГГ, 1969, вып. 3.

Лейпунская Д.И., Гауэр З.Е., Флеров Г.Н. Нейтронный активационный анализ образцов горных пород, руд и продуктов технологической переработки. — Атомная энергия, 1959, № 3.

Лейпунская Д.И., Савосин С.И., Сулин В.В. Активационные методы элементного анализа горных пород и руд. — Вестн. АН СССР, 1972, № 1.

Лейпунский О.И. Распространение гамма-квантов в веществе. М., Атомиздат, 1959.

Леммлейн Г.Г. Краткий отчет о поездке в Хакассский уезд Енисейской губернии летом 1925 г. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1926, № 4.

Леонова Л.Л. Уран и торий в гидротермально-измененных породах г. Кызыл-Омпул (Северный Тянь-Шань). — Геохимия, 1963, № 6.

Лесик И.Г., Усачев П.М. Определение местоположения трещин гидроразрыва при помощи шариков-реперов. — Нефть хоз-во, 1960, № 10.

Лобанов Е.М., Новиков А.Н., Хайдаров А.А. Активационный анализ в условиях геологических скважин. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1963.

Лондон Э.Е. Йод в пластовых водах нефтяных и газовых месторождений. — В кн.: Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений, № 7. М., ВНИИОЭНГ, 1972.

Духминский Б.Е. Некоторые вопросы теории фотонейтронного метода исследования горных пород. Канд. дис. М., 1965 (ВНИИЯГТ).

Любавин Ю.П. Спектры гамма-излучения объемных радиоактивных источников в области энергии до 300 кэВ. Канд. дис. М., 1965 (ВНИИЯГТ).

Маларов К.Л. Воды нефтяных месторождений. — Труды Нефт. геолразв. ин-та. Сер. А, 1934, вып. 46.

Матвеев В.В., Гольбек Г.Р. Энергетическое распределение гамма-квантов от точечного источника гамма-излучения в бесконечной песчаной среде. — Атомная энергия, 1956, № 4.

Матвеев К.К. Боршовочное месторождение монашита. Л., Госгеолтехиздат. 1934.

Малышек В.Т. Геохимические признаки промышленных залежей нефти. — Труды XVII сессии Международного геологического конгресса, т. 4. М., Госгеотехиздат, 1940.

Мейер В.А. Каротаж скважин при разведке полиметаллических месторождений. Изд-во Львовск. ун-та, 1960.

Мелик-Нубаров Л. Некоторые сведения об истощении нефтеносных пластов участка № 7 Биби-Эйбата. — Труды Бакин. отд. Рус. техн. о-ва, 1911, вып. 5–6.

Мещеряков И.А. Применение радиометрических методов исследования скважин в районах Куйбышевского Поволжья. — В кн.: Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых. М., Гостоптехиздат, 1960.

Миллер В.В. Методы экспериментального исследования нейтронных диффузионных параметров горных пород и флюидов на небольших образцах вещества. Канд. дис. М., 1966 (ВНИИЯГТ).

Миллер В.В. Метод определения среднего времени жизни тепловых нейтронов по измерениям на небольших образцах вещества. — Атомная энергия, 1967, № 1.

Митрофанов К.П., Полак Л.С., Александров А.Ю. Устройство для раздельного определения химических элементов в горных породах. Авт. свид. № 245931, ноябрь 1962 г.

Михайловский В.Н., Старбинец Н.С. К вопросу о выборе индикатора для измерения гамма-излучения в скважине. — В кн.: Вопросы автоматизации и измерительной техники. Киев, Изд-во АН УССР, 1956.

Моисеенкова И.Г., Лесик Н.П., Усачев П.М. Способ определения местоположения трещин гидроразрыва пласта при помощи введения в них радиоактивного вещества. Авт. свид. № 124387, февраль 1959 г.

Московское отделение архива Академии наук СССР, ф. 518, оп. 3, ед. хран. 1273.

Мотт В.Е., Эдинггер Н.М. Радиоактивный каротаж при разведке и добыче нефти. — Труды V Международного нефтяного конгресса, т. 1. Геология и геофизика. М., Гостоптехиздат, 1961.

Муслимов Р.Х., Валиханов А.В., Султанов С.А. Освоение и эксплуатация нефтяных месторождений Татарии. Казань, Татар. кн. изд-во, 1973.

Мысовский Л.В. Государственный радиевый институт и его деятельность. — Природа, 1925, № 7–9.

Мысовский Л.В. Измерения проникающей радиации на Онежском озере летом 1925 г. — Природа, 1925, № 6–9.

Мысовский Л.В. Лабораторный метод получения высоких потенциалов. — Усп. физ. наук, 1930, № 10.

Науом Г.Б. О роли комплексобразования при переносе и отложении урана гидротермальными растворами. — Геохимия, 1963, № 5.

Недоступ Г.А. Некоторые вопросы использования спектрометрии гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов в радиометрии скважин. Канд. дис. М., 1964 (МИНХИГП).

Нелепо Б.А. Ядерная гидрофизика. М., Атомиздат, 1970.

Ненадкевич К.А. Радиоактивные минералы Тюя-Муюна. — Изв. АН. СПб., 1909.

Ненадкевич К.А., Волков П.А. О новом минерале — тангите из Тюя-Муюна. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1926, № 3.

Никитин Б.А. Содержание радия в буровых водах нефтепромыслов Ферганской области. — Докл. АН. Сер. А, 1932, № 1.

Никитин Б.А., Комлев Л.В. Содержание радия в буровых водах Бакинского нефтяного района и Дагестанской области. — Труды Радиового ин-та, 1930, 1.

Никитин Б.А., Меркулова М.С. Радий в пластовых водах и нефти нефтяного месторождения Биби-Эйбат. — Труды Радиового ин-та, 1933, 2.

Никифоров П.Н. Достижения в области прикладной геофизики за 10 лет. —

В кн.: Наука и техника СССР, 1917–1927 гг. М., "Работник просвещения", 1927.

Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки, Л., "Недра", 1965.

Об избрании Радиевой комиссии. — Изв. АН. Сер. VI, 1913, № 18.

Оболенская А.Н. Состояние и перспективы применения радиоактивных изотопов при разработке нефтяных и газовых месторождений. — Труды Всесоюзного совещания по применению радиоактивных изотопов и излучений в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1957.

Оводов Н.Е., Кудашев Э.Т., Зверева О.В. О связи пространственного распределения, размещения и формирования газовых месторождений. — В кн.: Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений, № 4. М., ВНИИОЗНГ, 1972.

Овчинников А.М. Общая гидрогеология. М., Гостеоллиздат, 1955.

Организация науки в первые годы Советской власти. Сборник документов, Л., Изд-во АН СССР, 1968.

Орлов П.П. О находке урановой залежи в Енисейской губернии. — В кн.: Протоколы О-ва естествоиспытателей и врачей при Томском университете. Томск, 1908–1909.

Орлов П.П. Об урановых минералах в Енисейской губернии. — Протоколы О-ва естествоиспытателей и врачей при Томском университете. Томск, 1912.

Орлова М.П. Нахождение радиоактивных элементов и редких газов в Сибири и возможность их использования. — Труды краевого Сибирского научно-исследовательского съезда, т. 1, 1927; т. 2, 1928.

Осведомительный бюллетень по полезным ископаемым. Запасы радия в Бельгийском Конго. — Вестн. Геол. ком., 1928, № 6.

Осипов В.И. Определение плотности и влажности грунтов по рассеянию гамма-лучей и нейтронов. М., Изд-во МГУ, 1968.

Основы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (методическое пособие). М., ВНИИЯГГ, 1965.

Основы импульсных нейтронных методов каротажа (методическое пособие). М., ВНИИЯГГ, 1969.

Отношение химического отдела ВСНХ в КЕПС. Архив АН СССР, ф. 132, оп. 1, ед. хран. 283, л. 6.

Отчет Геологического комитета за 1921, 1922 гг. Л., Изд-во АН СССР, 1924, 1926.

Отчет Геологического музея Академии наук за 1912 г. СПб., 1913.

Отчет о деятельности Академии наук по физико-математическому и историко-филологическому отделениям за 1912 г. СПб., 1912.

Отчет о деятельности Академии наук по физико-математическому и историко-филологическому отделениям за 1913 г. СПб., 1913.

Отчет о деятельности Академии наук по физико-математическому и историко-филологическому отделениям за 1915 г. Пг., 1915.

Отчет о деятельности Академии наук по отделениям физико-математических и историко-филологических наук за 1917 г. Пг., 1917.

Отчет о состоянии и деятельности Геологического комитета в 1920 г. Изд. Геол. ком., 1925, 40, № 7.

Очкур А.П. Каротаж плотности. — В кн.: Вопросы рудной геофизики, № 1. М., Гостоптехиздат, 1957.

Очкур А.П., Фельдман И.И. Ядерно-геофизические методы определения вещественного состава пород и руд в естественном залегании. М., ОНТИ ВИЭМС, 1970.

Пейсиков Ю.В., Шацов А.Н. Применение подводной радиометрической съемки морского дна. — Геол. нефти и газа, 1962, № 3.

Первое научное совещание по изотопам. — Вестн. АН СССР, 1940, № 7.

Перьков Н.А. Интерпретация результатов каротажа скважин. М., Гостоптехиздат, 1963.

Петражак К.А., Кондратько М.Я., Никотин О.Н., Теплых В.Ф. Запаздывающие нейтроны при фотоделении урана-238. — Атомная энергия, 1963, 15, вып. 2.

Печерников В.Ф. Разработка аппаратурной группы с автоматической регистрацией для гамма-нейтронного каротажа с гамма-счетчиком. Отчет. Фонды ВНИИ Геофизики, 1948а.

Печерников В.Ф. Нейтронный каротаж. Отчет. Фонды ВНИИ Геофизики, 1948б.

Печерников В.Ф., Коржев А.А. Прибор для гамма-каротажа. Авт. свид. № 76078, август 1948 г.

Пирс А.П., Миттон Д.В., Барнетт П. Геохимия урана в органических веществах нефтеносных пород. — В кн.: Труды 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958), т. 8. М., 1959.

Плаксин И.Н., Старчик Л.П. Ядерно-физические методы контроля вещественного состава. М., "Наука", 1966.

Плотников Р.П. Малогабаритная ускорительная трубка для генератора нейтронов. Канд. дис. Л., 1964. (Ленингр. политехн. ин-т).

Погодин С.А., Либман Э.П. Как добыли советский радий. М., Атомиздат, 1971.

Полак Л.С. Способ определения проницаемых пород в разрезе буровых скважин с помощью каротажа по тепловым нейтронам. Авт. свид. № 97494, май 1951 г.

Полак Л.С. Некоторые закономерности естественной радиоактивности мезозойских и третичных отложений Прикаспийской впадины. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 17. М., Гостоптехиздат, 1952.

Поляченко А.Л. Решение краевой задачи теории импульсного нейтронного каротажа. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Поляченко А.Л. Теория метода нестационарной диффузии в приложении к задачам импульсного нейтронного каротажа. Канд. дис. Новосибирск, 1964 (ИЯФ СО АН СССР).

Поляченко А.Л., Гаврина Т.Е., Цейтлин В.Г., Шапошникова Т.А. Анализ амплитудных, временных и пространственных характеристик распределения гамма-квантов при ИНГК. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1969.

Поляченко А.Л., Кантор С.А. Асимптотическое по времени распределение нейтронов при импульсном нейтронном каротаже. — В кн.: Ядерная геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Померанц Л.И., Каплунов А.И. Аппаратура для радиоактивного каротажа типа НГГК-57. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 29. М., Гостоптехиздат, 1959.

Понтекорво Б.М. Энрико Ферми (1901–1954 гг.). — Усп. физ. наук, 1955, 57, № 3.

Понтекорво Б.М. Грани таланта (размышления о научном пути и судьбе Энрико Ферми). — Наука и жизнь, 1974, № 1.

Попов Н.В., Школьников А.С. Опыт применения импульсных нейтронных методов на месторождениях полезных ископаемых. — Бюл. НТИ ВНИИОЭНГ. М., 1968.

Постановление Совета Труда и Оборона "О добыче и учете радия". — Известия, 1923, 8 марта.

Потылицын Л.Н. Состав вод, сопровождающих нефть. — ЖРФХО, часть химическая, 1882, вып. 6.

Потылицын Л.Н. Состав вод, сопровождающих нефть. — ЖРФХО, часть химическая, 1883, вып. 3, 6.

Предит А.Т. Исследования воды в роли спутника нефти и углеродных газов. — Труды Бакин. отд. Рус. техн. о-ва, 1906, вып. 11, 12.

Приказ Министерства геологии и охраны недр СССР об организации Всесоюзного научно-исследовательского института ядерной геофизики и геохимии в г. Москве. Архив ВНИИЯГ, 1961.

Применение радиоактивных изотопов и излучений в нефтяной промышленности. (Труды Всесоюзного совещания). М., Гостоптехиздат, 1957.

Промысловая геофизика (сб. переводов). Под. ред. С.Г. Комарова. М., "Недра", 1970.

Протокол заседания Отделения физико-математических наук Академии наук от 25 января 1922 г. — В кн.: Организация науки в первые годы Советской власти (сб. док.). Л., Изд-во АН СССР, 1968.

Протокол заседания Технического совета Химического отдела ВСНХ от 24 марта 1919 г. Архив Академии наук СССР, ф. 1, оп. 2-1922, ед. хран. 14, л. 47.

Протоколы Геологического комитета. — Изв. Геол. ком., 1926, 41, № 6–9.

Протоколы заседания Ученого совета по проблеме использования достижений ядерной физики в нефтедобывающей промышленности. Фонды МИНХиГП. М., 1947–1948.

Путкардзе Л.А., Касумов К.А., Нечаев Ю.В. Выделение продуктив-

ных интервалов геофизическими методами при доразведке месторождений нефти и других полезных ископаемых в Азербайджане. — В кн.: Ядерно-физические и акустические методы выделения продуктивных пластов в обсаженных скважинах. М., "Недра", 1973.

Пшевоцкий К.С. и др. Поиски калийных солей радиоактивными методами. — Труды Всесоюзной конференции по применению изотопов и ядерных излучений. М., Гостоптехиздат, 1971.

Радий в России (беседа с В.И. Вернадским). — Вечернее время, 1913, 19 октября.

Радиевый институт имени В.Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания. М., "Наука", 1973.

Радиоактивные методы исследования нефтяных и газовых скважин. М., "Недра", 1958. Авт.: О.А. Барсуков, Н.М. Блинова, С.Ф. Выборных и др.

Ранкама К. Изотопы в геологии. М., ИЛ, 1955.

Рафальский Р.П. К вопросу об условиях переноса и отложения урана гидротермальными водами и о роли комплексобразования в этих процессах. — Геохимия, 1963, № 5.

Рачинский М.З. О распределении дейтерия в подземных водах толщи Апшеронской нефтегазоносной области. — В кн.: Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений, № 4. М., ВНИИГазпром, 1972.

Резванов Р.А. Зависимость результатов импульсного нейтронного каротажа от длины зонда и содержания водорода и хлора в среде. — В кн.: Новое в методике и технике промысловой геофизики. М., ЦНИИТЭнефть, 1963.

Резванов Р.А. Расчет методом статистических испытаний некоторых задач импульсного нейтрон-нейтронного метода изучения горных пород. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 39. М., Гостоптехиздат, 1964.

Резванов Р.А. Приближенный учет неупругого рассеяния нейтронов и анизотропии упругого рассеяния в центре масс при решении задач нейтронного каротажа методом Монте-Карло. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1969.

Резванов Р.А. Способ анализа горных пород, содержащих элементы с

высоким сечением поглощения нейтронов. Авт. свид. № 351145, апрель 1970 г.

Резванов Р.А., Денисюк С.А., Лебедев В.Е. Результаты математического моделирования задачи о пространственно-временном распределении тепловых нейтронов в двухслойной среде с цилиндрической границей раздела. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 51. М., "Недра", 1968.

Резолюция Первого съезда нефтероботников. — Нефть и сланц. хоз-во, 1925, № 12.

Рибу Ж., Шустер Н.А. Современные достижения в промыслово-геофизических исследованиях скважин. — Труды VIII Международного нефтяного конгресса, ОД-7. М., "Недра", 1971.

Роджерс Д.Ш. Химическое соотношение вод нефтяных месторождений. Пер. с англ. М., Гостоптехиздат, 1924.

Романов В.В., Сойфер В.Н. Применение природного трития в гидрогеологических исследованиях. — В кн.: Проблема геохимических поисков нефтяных и газовых месторождений и вопросы ядерной геологии. М., "Недра", 1968.

Савосин С.И., Лейтунская Д.И., Сулин В.В. и др. Основные направления использования типовой аппаратуры для активационного анализа при исследованиях горных пород и руд. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1958.

Савченко В.П. Смещение газовых и нефтяных залежей. — Нефть. хоз-во, 1952, № 12.

Самарцева А.Г. Содержание радиоэлементов в пластовых водах среднеазиатских нефтяных месторождений. — Труды Радиового института, 1937, 3.

Свенсон А.Н., Брагин А.А. Способ радиоактивного каротажа скважин. Авт. свид. № 115663, октябрь 1957 г.

Селективный гамма-гамма каротаж. — В кн.: Справочник геофизики. Т. 2. М., Гостоптехиздат, 1961.

Сельский В.А. О буровых водах Грозненской нефтеносной площади. — Грозн. нефть. хоз-во, 1922, № 4.

Семихатов А.Н. О гидрогеологических циклах. — Докл. АН СССР, 1947, 56, № 6.

Сенько А.К. Изучение характера корреляции радиоактивных элементов с нерадиоактивными. — В кн.: Вопросы рудной геофизики, вып. 3. М., Госгеотехиздат, 1961.

Слепков С.А. Выделение зон тектонического дробления горных пород геофизическими методами в углеразведочных скважинах Кузбасса. — Разв. и охр. недр, 1968, № 5.

Соболев В.Л. Уравнения математической физики. 3-е изд. М., Гостеортехиздат, 1954.

Совещание в Министерстве народного просвещения об ассигнованиях для исследований радиевых месторождений в России. — ЦГИАЛ, ф. 733, оп. 145, ед. хран. 260.

Сойфер В.Н., Егоров А.В. Определение концентрации дейтерия в природных водах фотонейтронным методом. — В кн.: Вопросы изотопной геологии. М., ОНТИ ВИЭМС, 1966.

Соколов В.А. Происхождение нефти и радиоактивность. — Труды XVII сессии Международного геологического конгресса, т. 4. М., Гостеотехиздат, 1940.

Соколов В.А., Коржев А.А. Радиоактивные методы предупредительного контроля при бурении наклонных скважин по угольному пласту. — Подземная газификация каменного угля, 1957, № 3.

Соколов Ю.И. Измерение диффузионных нейтронных параметров крепленых скважин импульсным методом. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1966, № 1.

Соколов Ю.И. Экспериментальные исследования нестационарной диффузии тепловых нейтронов в пласте, пересеченном скважиной. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1967, № 7.

Соколовский Э.В. Применение радиоактивных изотопов для контроля за разработкой нефтяных месторождений. М., "Недра", 1968.

Соколовский Э.В., Зайцев В.М. Применение изотопов на нефтяных промыслах. М., "Недра", 1971.

Сохранов Н.Н. Разработка и внедрение методов машинной интерпретации промыслово-геофизических данных. Докт. дис. М., 1969 (ВНИИЯГГ). Справочник геофизика. Т. 2. М., Гостоптехиздат, 1961.

Справочник геофизика. М., "Недра", 1977.

Сребродольский Д.М. К интерпретации диаграмм селективного каротажа. — В кн.: Вопросы разведочной радиометрии. М., Гостоптехиздат, 1959

Сребродольский Д.М. К вопросу об интерпретации результатов импульсного нейтрон-нейтронного каротажа. — В кн.: Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. М., Атомиздат, 1963.

Сребродольский Д.М., Денисюк Ф.П., Школьников А.С. Основы методики проведения и интерпретации материалов импульсного нейтрон-нейтронного каротажа. — Совещание в рамках СЭВ по использованию методов импульсного каротажа, Сб. докл. М., 1968.

Сребродольский Д.М., Шимилевич Ю.С. О состоянии и направлениях разработки импульсных нейтронных методов. — В кн.: Импульсный нейтронный каротаж. М., ВНИИЯГГ, 1968.

Старик И.Е. К вопросу о коллоидных свойствах полония. — Труды Радиового ин-та, 1930, 1.

Старик И.Е. Вопросы геохимии урана и радия. — В кн.: Академику В.И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности. М., Изд-во АН СССР, 1936.

Старик И.Е., Щепотьева Е.С. Методы определения радиоактивности природных образований. М., Гостеолтехиздат, 1956.

Старосельская-Никитина О.А. История радиоактивности и возникновения ядерной физики. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Стопневич А.Д. Об исследованиях пластовых вод буровой скважины в Ставрополье. — Изв. Геол. ком. 1919 г., 1923, 38, № 2.

Стрижак В.И. Неупругое взаимодействие нейтронов с энергией 14 МэВ с атомными ядрами. — Атомная энергия, 1957, № 1.

Стрижев Н.И. Применение способа нейтронного каротажа для обнаружения гидратных пробок в газопроводах. Авт. свид. № 78069, февраль 1949 г.

Сулин В.А. Воды нефтяных месторождений СССР. М.-Л., ОНТИ НКТП, 1935.

Сулин В.А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод. Ч. 1. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1948.

Султанов С.А. Контроль за заводнением нефтяных пластов. М., "Недра", 1974.

Султанов С.А., Хорьков В.А. Контроль за движением водонефтяного кон-

такта и контуров нефтеносности. М., Гостоптехиздат, 1962.

Суханов А.Д., Баранов В.И., Генералов О.Н. и др. Применение методов атомной и ядерной физики в горном деле. М., "Наука", 1969.

Тагеева Н.В. Геохимия и происхождение радия в пластовых хлоридно-щелочноземельно-натриевых рассолах. — Труды Лабор. гидрогеол. проблем, 1958, т. 20.

Тагеева Н.В., Старик Ф.Е. Содержание радия в нефтяных водах о-ва Челекен. — Докл. АН СССР, Сер. А, 1931, № 7.

Тальянский И.И. Основы теории импульсного нейтронного каротажа. — В кн.: Прикладная геофизика, № 26. М., Гостоптехиздат, 1960.

Тальянский И.И., Гайда Р.П. Теоретические исследования по радиоактивному каротажу. Львов, Изд-во Львовск. ун-та, 1961.

Тверцын В.С., Милин В.Б. Радиоактивность буровых вод Грозненского района. — Нефть. хоз-во, 1929, 14, № 11—12.

Тер-Оганесов Я.Г., Гвайта Т.И., Роцин Ю.В. Методика и техника аэрогеофизических поисков месторождений урана за рубежом. — В кн.: Вопросы геологии урана. М., Атомиздат, 1957.

Тимофеева Т.В. Детектор медленных нейтронов. — Атомная энергия, 1957, № 8.

35 лет Радиевого института имени В.Г. Хлопина. Л., Изд-во АН СССР, 1957.

Труды по изучению радия и радиоактивных руд Академией наук, т. 1. СПб., 1914.

Труды радиевой экспедиции Академии наук, т. 2. Л., Изд-во АН СССР, 1926.

Трум А.Д., Чуркин В.П. Применение методов ИННК, НГК и ГК для выделения нефтегазоносных пластов. — В кн.: Геофизические исследования на Украине. Киев, изд-во "Тектоника", 1971.

Унковская В.А. Определение малых количеств урана люминесцентным методом. — Докл. АН СССР, 1940, 29, № 5—6.

Фатхутдинов Х.Н., Урманов Р.Л. О влиянии диаметра скважины на глубину нейтрон-нейтронного каротажа. — В кн.: Применение ядерных излучений

в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973а.

Фатхутдинов Х.Н., Урманов Р.Л. О количественных показателях избирательности ядерно-физических методов. — В кн.: Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973б.

Федосеев И.А. Развитие знаний о происхождении, количестве и кругообороте воды на Земле. М., "Наука", 1967.

Федосеев И.А. История изучения основных проблем гидросферы. М., "Наука", 1975.

Федынский В.В., Комаров С.Г. Геофизические исследования скважин в СССР. — Труды IV Международного нефтяного конгресса. М., Гостоптехиздат, 1956.

Фельдман И.И. Современное состояние радиоактивных методов исследования скважин (обзор, № 7). М., ОНТИ ВИЭМС, 1967.

Ферми Э. Теория бета-распада. М., Гостеортехиздат, 1934.

Ферронский В.И. Использование изотопов в гидрологии и гидрогеологии. — Атомная энергия, 1968, № 2.

Ферронский В.И., Данилин А.И., Дубинчук В.Т. и др. Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. М., Атомиздат, 1968.

Ферсман А.Е., Щербаков Д.И. Тюя-Муконское месторождение радиевых руд в Фергане. — Труды Научно-технического общества, № 74. М., 1925.

Физические основы импульсных нейтронных методов исследования скважин. М., "Недра", 1976. Авт.: Ю.С. Шимилевич, С.А. Кантор, А.С. Школьников и др.

Филиппов К.С. Краткий обзор поисков и разведок руд и редких металлов в Алтае-Саянской системе. — Труды Научной конференции по изучению и освоению производительных сил Сибири, т. 2. Томск, 1940.

Филиппов Е.М. Разработка метода гамма-гамма каротажа (ГГК). Отчет. Фонды ВНИИГеофизики, 1955.

Филиппов Е.М. Гамма-гамма каротаж с генератором гамма-квантов. — Изв. Томск. политехн. ин-та, 1959, 96, № 1.

Филиппов Е.М. Ядерно-геофизические методы изучения элементного состава

горных пород. Докт. дис. М., 1965 (МИНХиГП).

Филиппов Е.М. К вопросу о классификации и состоянии методов ядерной геофизики. — В кн.: Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Новосибирск, "Наука", 1973а.

Филиппов Е.М. Ядерная геофизика. Т. 2. Нейтронметрия и комплексирование методов ядерной геофизики. — Труды Ин-та геол. и геофиз. СО АН СССР, 1973б, вып. 41.

Филиппов Е.М., Варварин Г.Б. Плотностный гамма-гамма метод в геофизике. Новосибирск, "Наука", 1972.

Флексер Н.Я. Радиоактивные изотопы как индикаторы для контроля фильтрационных потоков. — Атомная энергия, 1961, № 5.

Флеров Г.Н. Эксперименты по синтезу и поиску в природе трансуранных элементов (текст выступления на IV конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1971 г.). — В кн.: Учение о радиоактивности, история и современность. М., "Наука", 1973.

Флеров Г.Н. Исследования радиоактивности в Советском Союзе. — Труды XIII Международного конгресса по истории науки (Москва, 1971), т. К. М., "Наука", 1975.

Флеров Г.Н., Алексеев Ф.А. Использование радиоактивных излучений при разведке и разработке нефтяных месторождений. Докл. на сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии 1–5 июля 1955 г. Заседания отд. техн. наук. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Флеров Г.Н., Алексеев Ф.А. Использование радиоактивных излучений при разведке и разработке нефтяных месторождений. — Труды IV Международного нефтяного конгресса. М., Гостоптехиздат, 1966.

Флеров Г.Н., Алексеев Ф.А., Ерозолимский Б.Г. Перспективы использования радиоактивных излучений в геологии при поисках и разведке полезных ископаемых. — Труды Всесоюзной научно-технической конференции по применению радиоактивных изотопов и излучений в народном хозяйстве и науке. М., Гостоптехиздат, 1958.

Флеров Г.Н., Перельягин В.П., Отгонсурен О. О происхождении следов осколков деления в свинцовых стеклах. Препринт ОИЯИ. Дубна, 1972.

Фридман Ш.Д. Об исследованиях спектрального состава гамма-излучения горных пород в естественном залегании. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1960, № 8.

Хайтов Б.К. Расчет дозы радиоактивных изотопов, применяемых в качестве индикаторов для изучения движения подземных вод. — Докл. АН УзССР, 1962, № 5.

Хайдаров А.А. Ядерно-геофизические методы анализа горных пород и руд. Ташкент, "Фан", 1969.

Харичков К.В. О воде, сопровождающей нефть и нефтяные газы. — Горно-заводский листок, № 35. Харьков, 1906 а.

Харичков К.В. О составе соляной массы в Грозненском нефтяном месторождении. — Нефть. дело, 1906б, № 8.

Харичков К.В. Об исследованиях буровых вод. — Горный журнал, 1910, № 8.

Харичков К.В. Содержание сернокислых солей в буровых водах. — Нефть. дело, 1913, № 10.

Хельквист Г. Методы обработки химических анализов вод нефтяных месторождений. — Азерб. нефт. хоз-во, 1926, № 2 (50).

Хисамутдинов А.И. Решение некоторых вопросов теории метода Монте-Карло и двух задач ядерной геофизики. Канд. дис. Новосибирск, 1969 (ИЯФ СО АН СССР).

Хлопин В.Г. Радий и его получение из русского сырья. — В кн.: Труды по изучению радия и радиоактивных руд. Л., Изд-во АН СССР, 1924.

Хлопин В.Г. К вопросу о миграции радия в земной коре. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1926, № 9.

Хлопин В.Г. Краткий очерк развития радиевого дела в России. — В кн.: 35 лет Радиевого института имени В.Г. Хлопина. Л., Изд-во АН СССР, 1957.

Хлопин В.Г. Докладная записка. — В кн.: Организация науки в первые годы Советской власти (сб. док.). Л., Изд-во АН СССР, 1968.

Хлопин В.Г., Никитин Б.А. К вопросу о содержании радия в нефтяных водах Грозненского района. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1930, № 15.

Холин А.И. Разделение нефтеносных и водоносных пластов в обсаженных скважинах радиоактивности методами исследования. — Труды Сессии АН СССР

по мирному использованию атомной энергии. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Холин А.И. Лаборатория ядерной геофизики. — В кн.: Труды МИНХиГП, 1968, вып. 91.

Холин А.И., Дахнов В.Н. Разработка и промышленное опробование радиометрических методов. Отчет. Фонды МИНХиГП. М., 1955.

Холин А.И., Дахнов В.Н., Ларинов В.В., Султанов С.А. Усовершенствование радиометрии скважин. Отчет. Фонды МИНХиГП. М., 1956.

Хуснуллин М.Х. Радиогеохимический метод изучения движения пластовых вод при разработке нефтяных месторождений. Канд. дис. М., 1969 (ВНИИГГ).

Цлав Л.З. Разработка радиометрических методов контроля за обводнением продуктивных карбонатных пластов. — Труды Куйбышев. науч.-исслед. ин-та нефт. пром-сти, 1968, вып. 40.

Цлав Л.З., Лантев В.В. Использование комплекса радиометрических методов для определения водонесущего раздела в карбонатных коллекторах. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968.

Чердынцев В.В. Ядерная вулканология. М., "Наука", 1973.

Чердынцев В.В., Мешков В.И. О колебаниях нейтронного потока у земной поверхности. — Бюл. Ком. по определению абсолютного возраста геологических формаций, вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Черепеников А.А. Несколько определений радиоактивности природных газов Бакинского района. — Изв. Ин-та прикл. геофиз., 1927, вып. 3.

Черепеников А.А. Проявления радиоактивности в Ухтинском районе. — Вестн. Геол. ком., 1928, № 4.

Черник Г.П. О природе и химическом составе монацитового песка, найденного на Кавказе. — Зап. Минерал. о-ва. Сер. 2, 1904, ч. 41, вып. 1.

Шаллер Г.Е. Новое в радиоактивном каротаже. — Труды IV Международного нефтяного конгресса, т. 2. М., Гостоптехиздат, 1956.

Шапиро Д.А. Применение радиоактивных методов исследования скважин в Татарской АССР. — В кн.: Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых. М., Гостоптехиздат, 1960.

Шимилевич Ю.С. О комплексном использовании модификаций импульсных

и стационарных методов. — В кн.: Импульсный нейтронный каротаж. М., ВНИИГГ, 1968а.

Шимилевич Ю.С. Физические основы нейтронных методов исследования скважин с использованием временного анализа излучений. Докт. дис. М., 1968б (ВНИИГГ).

Шимилевич Ю.С., Школьников А.С. Физические основы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа. — В кн.: Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. М., Атомиздат, 1962.

Шимилевич Ю.С., Попов Н.В., Горбунов В.Ф. Некоторые вопросы временного распределения гамма-излучения, возникающего при облучении горных пород быстрыми нейтронами. — В кн.: Ядерная геофизика. М., "Недра", 1968.

Школьников А.С. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа для отбивки водонефтяного контакта в обсаженных скважинах. — Нефт. хоз-во, 1960, № 8.

Школьников А.С., Беспалов Д.Ф., Берзин А.К. и др. Способ импульсного фотонейтронного каротажа скважин. Авт. свид. № 197032, июль 1962 г.

Школьников А.С., Поляченко А.Л., Кантор С.А., Спасский А.Б. Теоретическая и экспериментальная разработка методики количественного определения нейтронных диффузионных параметров горных пород по данным импульсных нейтронных методов. Отчет. Фонды ВНИИГГ. М., 1967.

Шпак В.А. Новые виды каротажа скважин. — Проблемы советской геологии, 1938, вып. 8.

Шпак В.А., Горшков Г.В., Бочков Л.И. и др. Устройство для гамма-каротажа скважин. Авт. свид. № 48895, сентябрь 1935 г.

Шредер К.Д., Взоннер Д.А., Зенгер Д.Х., Стиннер Р.Д. Нейтронно-гамма-лучевой прибор для анализа состава лунной поверхности. — Ракетная техника, 1962, № 4.

Щербakov Д.И. К минералогии окрестностей селения Лякан в Южной Фергане. — Докл. АН СССР. Сер. А, 1926, № 10.

Эйфе К.Г., Якубсон К.И. Методика спектрометрии гамма-излучения радиационного захвата в скважинах. — Труды МИНХиГП, 1974, вып. 111.

Эффендиев Г.Х., Алекперов Р.А., Нуриев Л.Н. Вопросы геохимии радио-

активных элементов нефтяных месторождений. Баку, Изд-во АН УзССР, 1964.

Юманс А., Циммерман К. Использование генератора нейтронов. Пер. с англ. — В кн.: Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. М., Атомиздат, 1963.

Ядерно-физические константы для нейтронного активационного анализа. М., Атомиздат, 1969. Авт.: А.И. Алиев, В.И. Дрынкин, Д.И. Лейпунская, В.А. Касаткин.

Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. М., Атомиздат, 1969. Авт.: А.Л. Якубович, Е.И. Зайцев, С.М. Пржиялговский и др.

Allen L.S., Mills W.R., Caldwell R.L. The effects of fluid in vasion in pulsed neutron logging. — Geophysics, 1965, 30, N 3.

Amaldi E., Fermi E. Absorption and diffusion of neutrons. — Phys. Rev., 1936, 50, p. 498.

Ambronn R. Methoden der angewandten Geophysik. Dresden, 1926.

Ambrose A.W. Analysis of oil-field water problems. — Bull. Amer. Inst. Min. and Met. Eng., 1920, N 9.

Ambrose A.W. Underground conditions in oil fields. — Bull. US Bur. Mines, Wash., 1922, N 195.

Baner P.E. Neutron capture gamma-ray spectra of earth-formations. — AIMME. Trans., 1957, 210.

Barton E.A. Über ein aus Rohpetroleum gewonnenes radioaktives. — Phys. Z., 1904, s. 511.

Batyrin G.N., Ilyina T.D., Popov N.I. [Батурын Г.Н., Ильина Т.Д., Попов Н.И.]. Soviet investigations on natural radionuclides in marine and ocean sediments. — Proc. Roy. Soc. Edinburgh, B, 1972, 72, N 16.

Becker A. — Z. angew. und allgem. Chem. Bull., 1923, N 131.

Belcher D. e.a. The measurement of soil moisture and gamma-ray scattering. — Civil Aeronaut. Admin. Techn. Devel. Rept, 1952a, N 127.

Belcher D. e.a. Nuclear methods for measuring soil density and moisture in thin surface layers. — Civil Aeronaut. Admin. Techn. Devel. Rept, 1952b, N 161.

Belter W.G. Peaceful uses of atomic energy. — Proc. 3rd Int. Conf., v. 14. Geneva, 1965.

Bernhard R.K., Chasek M. Soil density determination by means of radioactive isotopes — Nondestruct. Testing, 1953, 11, N 8.

Bethe H., Peierls R. The "neutrino". — Nature, 1934, 133, p. 532.

Blanchard A.B., Dewan I.T. Gamma-ray logs interpretation. — J. Petrol. Eng., 1953, 25, N 9.

Boltwood B.B. Ratio of radium to uranium in some minerals. — Amer. J. Sci., 1904, 18, p. 97.

Boltwood B.B. The origin of radium. — Phil. Mag., Ser. 6, 1905, 9, p. 599.

Bothe W., Becker H. Künstliche Erregung von Kern-gamma Strahlen. — Z. Phys., 1930, 66, s. 289.

Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1952, 36, N 2.

Busch R.E., Mardock E.S. The quantitative application of radioactivity logs. — J. Petrol. Technol., 1959, 3, N 7.

Caldwell R.L. Nuclear physics in petroleum exploration research. — World Petrol., 1956, 27, N 4.

Caldwell R.L., Sippel R.F. New developments in radioactive well logging research. — Bull. AAPG, 1958, 42, N 1.

Caldwell R.L., Mills W.R., Allen L.S. Combination neutron experiment for re-note. — Analysis Scient., 1956, N 4.

Cameron J.F., Bourne M.S. A gamma scattering soil density gauge for subsurface measurement. — Int. J. Appl. Radiat. and Isotop., 1958, 9, N 1.

Cook K.L. The new methods of explorations research. — Min. Eng., 1954, 6, N 2.

Corrosion Prevention and Control., 1966, 13, N 9.

Crews W.D. Radioactivity surveying. — Oil and Gas J., 1961, 59, N 19.

Czubek J.A. Recent Russian and European development in nuclear geophysics applied to mineral exploration and mining. — Log Analyst, 1971, 12, N 6.

Curie P., Laborde A. Sur la chaleur dégagée spontanément par les sels de radium. — Compt. rend., 1903, 136, p. 673.

Curie I., Joliot F. Emission de protons de grande vitesse les substances hyrogenes sous l'influence des rayons gamma. — Comt. rend., 1932, 194, p. 1229.

Curie I., Joliot F. Un nouveaux de radio-activite. — Compt. rend., 1934, 198, p. 254.

Dardell G.F. The interactions of neutrons with matter studied. — Phys. Rev., 1954, 94.

Dardell G.M., Sjostrand M. The diffusion parameters of thermal neutrons in water. — Phys. Rev., 1954, 95, p. 302.

Deegan C.J. New logging method. — Oil and Gas J., 1950, 48, N 43.

Dewan I.T., Alland L.A. Experimental basis for neutron logging interpretation.— J. Petrol. Eng., 1953, Sept.

Faul H., Tittle C.W. Logging of drill holes by the neutron-gamma method and gamma-ray scattering.— Geophysics, 1951, 16, p. 260.

Faro A. Measurement of soil density and moisture.— Nucleonics, 1951, 8, N 4.

Fearon H.E. Neutron well Logging.— Nucleonics, 1949, 4, N 6.

Fermi E. Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta".— Ricer. scient., 1933, 20, p. 491.

Fermi E., Amaldi E., D'Agostino O. e.a. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment.— Proc. Roy. Soc. London, A, 1934, 146, p. 483.

Frisch O. Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment.— Nature, 1939, 143, p. 239.

Frizsch E., Klöber J. Differentiating water and petroleum by means of a simple neutron-spectrometric method.— Kernenergie, 1964, 7, N 8.

Gerber C.R., Voress H.A. A selected annotated bibliography of ten civil, industrial and scientific uses for nuclear explosives.— US Atom. Energy Commiss. Techn. Inform. Extensive Oak Ridge, Tennessee, 37830, May 1966.

Goldstein H., Aronson R. Status report on calculation of gamma-ray penetration.— U.S. Atom. Energy Commiss. Repts, NVO-3079, August 20, 1953.

Gow J.D., Pollock H.C. Development of compact evacuated pulsed neutron source.— Rev. Scient. Instrum., 1960, 31, N 3.

Gregory A.F. Analysis of radioactive sources in aeroradiometric surveys over oil fields.— Can. Mining and Met. Bull., 1955, 49, N 20.

Green W.G., Fearon R.E. Well logging by radioactivity.— Geophysics, 1943, 3, N 3.

Hearings before the special subcommittee on radiation of the Joint Committee on Atomic Energy. Washington, v. 3, Congress USA, 1959.

Helms H. Radiumreiche ihres Heidelberg. Physikalische Erdforsch., 1924, N 14.

Herzog F., Karlik B. Zur geochemie der Urans in Abfallbecken.— Sitzungsber. Akad. Wiss. Abt., 1937, 4, N 5—6, s. 217.

Hevesy G. Natural and artificial radioactivity of potassium.— Nature, 1955, 135, p. 95.

Himstedt F. Über die radioaktive Emanation der wasser und Ölquellen.— Ann. Phys., 1904, 13, N 3.

Holmes A. Radioactivity and Earth movement.— Trans. Geol. Soc. Glasgow, 1931, 18, p. 117.

Howell L.G., Frosch A. Gamma-ray well logging.— Geophysics, 1939, N 4, p. 106.

Hoyer W.A. Inducted nuclear reaction logging.— J. Technol., 1961, 13, N 8.

Homilius J., Lorch S. On the theory of gamma-ray scattering in boreholes.— Geophys.— Geophys. Prospect., 1958, 6, N 4.

Homilius J. e.a. Radioactive Dichtebestimmung mit der Gamma-Gamma-Source.— Geol. Jahrb., 1958, 75.

Hyden H., Danilchik W. Uranium in some rocks of Pennsylvanian age in Oklahoma, Kansas and Missouri.— Geol. Surv. Bull., 1962, N 1.

Ilyina T.D. [Ильина Т.Д.]. New trends in the sciences of Earth studies in connection with the radioactivity concept.— Proc. XIVth Int. Congr. Hist. Sci., v. 3. Tokyo, 1974.

Jacobs J.A., Russel R.D., Wilson J.T. Physics and geology. N.Y. — London, 1959.

Jefferies F. A new era in well logging interpretation.— Oil Week, 1964, 15, N 19.

Joly J. On the radioactivity of certain lavas.— Phil. Mag., 1909, N 98.

Joly J. Radioactivity and geology. London, 1909.

Joly J. The radioactivity of the rocks.— Nature, 1924, 114, p. 214.

Joly J. Radioactivity and surface history of the Earth. Oxford, 1924.

Kellogg W.G. Gamma-ray oil exploration.— Mines Mag., 1956, 47, N 7.

Kellogg W.C. Observations and interpretation of radioactivity patterns.— Mines Mag., 1957, 47, N 5.

Kernanham G.M. Pembina-radiation logging.— Can. Oil and Gas Industr., 1955, 8, N 6.

Kuroda P.K. Nuclear fission in the early history of the Earth.— Nature, 1960, 187, N 4731.

Lane Wells Radioactivity Well Logging Bull. R-44-5, 1944.

Langford G.T. Radiation surveys aid oil search.— World Oil, 1962, 54, N 5.

Little J.W., Youmans A.N. The neutron lifetime test — a performance report.— Oil and Gas J., 1964, 62, N 36.

Logging research has new tool.— Oil and Gas J., 1954, 52, N 42.

Lorenz H. Über die Messung der Lagerungsdichte der Baugerundes mittels radioaktiver Isotope.— Baumasch. und Bautechn., 1954, 1, N 8.

- Marshak A.* Theory of the slowing down of neutron by elastic collisions with atomic nuclei. — *Rev. Mod. Phys.*, 1947, 19, p. 320.
- Maurer R.* Radioactive Dichtebestimmung. — *Petrol. Z.*, 1926, Apr.
- Measurement of soil density and moisture. — *Nuclenics*, 1951, 8, N 4.
- McCullough develops first neutron generator to check mineral content. — *Oil and Gas Canada*, 1955, 7, N 37.
- Merrit J. W.* Radiation survey method. US Patent N 2947880, 2.08. 1960.
- Miyake Y., Saruhashi K.* Disposal radioactive wastes. Vienna, Int. Atom. Energy Agency, 1960.
- Miyoshi H.* Research in the effects and influences of the nuclear test explosions. — *Jap. Soc. Promot. Sci.*, 1956, 2.
- Neubert H.* Zur praktischen Anwendung atomophysikalischer Strahlungen in Bauwesen unter besonderer Berücksichtigung der Baugrunderforschung. — *Baumasch. und Bautechn.*, 1951, 1, N 8.
- Niewodniczanski I., Sulin V. V., Vitozhenc G. Gh.* Determination of zinc content in upper silesian lead — zinc ore by means of photon activation analysis. — *Nucleonics*, 1967, 12, N 12.
- Newton G. R., Skinner J. E., Silvevan D.* New logging technique measures density, porosity. — *World Oil*, 1951, 139, N 7.
- Newton G. R., Skinner J. E., Silvevan D.* Subsurface formation density logging. — *Geophysics*, 1954, 19, p. 636.
- Oil well atom stasher. — *Drilling*, 1955, 16, N 11.
- Palmer Ch.* The geochemical interpretation of water analyses. — *US Geol. Surv. Bull.*, 1911, N 274.
- Palmer Ch.* The industrial application of water analyses. — *US Geol. Surv. Bull.*, 1911, N 479.
- Perrin J.* Matière et lumière. — *Ann. phys.*, 1919, p. 1021.
- Picciotto E., Wilgain S.* Thorium determination in deep sea sediments. — *Nature*, 1954, 173, N 4405.
- Pontecorvo B.* Neutron well logging. — *Oil and Gas J.*, 1941, 40, N 18.
- Rabe C. L.* A relation between gamma radiation and permeability. — *Denver Yulesburg basin*. — *J. Petrol. Technol.*, 1955, 9, N 2.
- Ramsay W., Soddy F.* Gases occluded by radium bromide. — *Nature*, 1903, 68, p. 246.
- Rancame K.* Isotope in geology. N.Y., 1954.
- Rögers G. S.* Some oil field in the Gulf Coast. — *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1917, N 3.
- Rösler R.* New method for the evaluation of radiometric borehole surveys. — *Bergakademie*, 1964, 16, N 8.
- Russel W. L.* Gamma-ray logging. US patent N 2469462, 1949.
- Rutherford E., Soddy F.* The cause and nature of radioactivity. pt. 1. — *Phil. Mag. Ser.* 7, 1902, 4.
- Rutherford E.* Some properties of the alpha-rays from radium. — *Phil. Mag. Ser.* 6, 1905, 10, p. 163.
- Rutherford E.* Bakerian lecture: nuclear constitution of atoms. — *Proc. Roy. Soc. London, A*, 1920, 97, p. 374.
- Salamon W.* — *Abhandl. Heidelberg. Akad. Wiss. math.-natur. Kl.*, 1926, N 14.
- Salamon-Calvi W.* Radiumreiche Erd Isolen und das Problem der Herkunft ihres Radium. Sitzungsber. Heidelberg. Akad. Wiss. math.-natur. Kl., 1931, 1, N 2.
- Scotty C. B., Egem E. F.* Neutron derived porosity influence of borehole diameter. — *J. Petrol. Technol.*, 1952, 4, N 8.
- Senttle F. E.* Mineral exploration by nuclear techniques. — *Mining Congr. j.*, 1970, N 1.
- Spenser L. V., Fano U.* Penetration and diffusion of X-rays. — *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1952, 46, p. 446.
- Stigand J. A.* Outlines of the occurrence and geology of petroleum, London, 1925.
- Swift G.* Semilaneus gamma-ray and neutron logging. — *Geophysics*, 1952, 17, p. 387.
- Swift G., Norelios R. G.* The multispaced Neutron Log-New Nuclear Radiation Logging method. — *Oil and Gas J.*, 1956, 54, N 76.
- Szasz S. E.* Adoption of well loggings methods to planetary explorations. — *Ann. N.Y. Akad. Sci.*, 1966, 140, N 1.
- Tittle C. W., Faul H., Goodman C.* Neutron logging of drill holes. The neutron — neutron method. — *Geophysics*, 1951, 16, N 5.
- Tittle C. W.* Theory of neutron logging. — *Geophysics*, 1961, 26, N 1.
- Tittman J.* Moderation of Neutrons in SiO₂ and CaCO₃. — *J. Appl. Phys.*, v. 26, N 4, 1955.
- Tittman J., Wahl J. S.* The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma). — *Geophysics*, 1965, 30, N 2.
- Toece L. W.* Scintillometer used in radiation logging. — *World Oil*, 1952, 135, N 3.

Trombka J.J., Metzger A.E. Neutron methods compositional studies. — Analysis Instrum., 1963, N 4.

United states Geology Survey. Wash. Bull., 1917, N 653.

Vomacil J.A. In situ measurement of soil bulk density. — Agr. Eng., 1954, 35, N 9.

World's smallest atom smasher tested. — Oil and Gas J., 1955, 54, N 28.

Vernof S.N. [Вернов С.Н.]. On the study of cosmic rays on the great altitude. — Phys. Rev., 1934, 46, p. 822.

Wesby G.H., Scherbatsky S.A. Well logging radiactivity. — Oil and Gas J., 1940, 38, N 41.

Wichman P.A., Youmans A.H., Hopkinson E.S. Advanced in neutron lifetime logging. — J. Petrol. Technol., 1967, 19, N 4.

Wyllie M.R.J. Procedure for the direct employment of neutron log data in electric log interpretation. — Geophysics, 1952, 17, N 4.

Wendt J. Versuche zur Dichebestimmung und Sandscütt. Durch Messung der Absorption von Gamma-Strahlen. — Geol. Jahrb., 1954, 70.

Wendt J., Woltoes R. Eine weitere Methode zur Bestimmung des Raumgewichtes von Boden durch Gamma-Strahlen. — Geol. Jahrb. 1956, 72.

Youmans A., Zimmerman C. Recent advances in the use of nuclear physics in oil well surveys. Proc. Vth World Petr. Congr., sect. X, Paper 17, N.Y., 1959.

Youmans A.H., Hopkinson E.S. Field results of neutron lifetime logs. — Drilling, 1964, 25, N 9.

Yomans A.H., Hopkinson E.S., Bergen R. Neutron lifetime a new nuclear log. — J. Petrol. Technol., 1964, 16, N 3.

Yomans A.H., Hopkinson E.S. Neutron lifetime logging in the Gulf Coast area. — J. Petrol. Technol., 1965, 5, N 2.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аб Э.А. 128
 Абих Г.В. 35, 36, 58
 Абрамович М.В. 35, 36
 Авдеева А.В. 122
 Аксельрод С.М. 98, 100, 113
 Алекин О.А. 46
 Алекпёров Р.А. 47
 Александров С.П. 13
 Алексеев Ф.А. 8, 47, 48, 56, 57, 104, 112, 118, 126, 147, 151
 Алиханов А.И. 12
 Алиханян А.И. 71
 Альпин Л.М. 61, 74
 Амальди Э. (Amaldi E.) 85
 Амбронн Р. (Ambronn R.) 23, 24, 30, 31, 65
 Андрусов И.А. 35, 59
 Антипов И.А. 10
 Антонов А.В. 119, 120
 Арбузов В.М. 136, 138, 157
 Арутинов О.М. 101
 Арцыбашев С.А. 27, 28

 Баембитов Ф.Г. 99
 Баранов В.И. 13, 28, 30, 40–42, 50, 51, 53, 57
 Барсуков О.А. 101
 Бартон Е. (Barton E.) 20
 Барыш-Тыщенко Л.Л. 77
 Басилов К. 44
 Баталина Э.П. 123
 Бауман В.И. 15
 Бекешко Н.А. 101
 Бекер А. (Becker A.) 38
 Белый Г.П. 152
 Беспалов Д.Ф. 8, 92, 101, 104, 112, 114, 118, 128, 129, 138, 139, 155
 Бланков Е.Б. 113, 136, 150, 152
 Бланкова Т.Б. 150
 Блинов К. 36
 Боговлянский Л.Н. 12–24, 29, 39, 40, 41, 61, 62
 Богословская Т.Н. 63
 Болтвуд Б. (Boltwood B.) 5
 Бондаренко Л.Н. 126

 Бочкарев Б.Н. 59
 Бочков Л.И. 64
 Бруновский Б. 30
 Булашевич Ю.П. 85, 86, 88, 110, 123, 133, 139, 154, 156
 Буров Б.М. 107, 124, 138

 Вавилов С.И. 7, 92
 Вайсберг А.С. 71
 Валиханов А.В. 137
 Варенцов М.И. 144
 Васин В.С. 129
 Вебер В.Н. 15, 30, 35
 Вернадский В.И. 9, 10, 12, 13, 15, 16, 33, 37, 42, 44, 46, 52, 53, 57, 58, 153
 Вернов С.Н. 12, 63, 66, 84
 Войцк Л.Р. 121, 128, 129, 135
 Волков П.А. 13
 Воробьева В.Я. 47, 48, 57
 Воронков Л.Н. 129, 139
 Воскобойников Г.М. 108, 109
 Выборных С.Ф. 142
 Высоцкий Б.П. 8

 Гаврилов Я.В. 23
 Галонский П.П. 114
 Галеев А.Ш. 114, 136
 Ганшин С.М. 64
 Гедовиус А.К. 29
 Герасимов А.П. 13, 15
 Герасимов В.Г. 46
 Герлинг Э.К. 13
 Гернеггер Ф. (Hernegger F.) 46
 Глазов Е.Ф. 98, 104
 Глауберман А.Е. 130, 132
 Головацкая И.В. 136
 Голубятников Д.В. 36, 37, 54
 Гольбек Г.Р. 92, 112, 114, 118, 154, 155
 Горбунов В.Ф. 139
 Горшков Г.В. 8, 13, 63, 64, 66, 68, 75–77, 84–86, 88, 154
 Готтих Р.П. 47, 48, 57
 Гофер Г. 35
 Граммаков А.Г. 19, 30, 63, 64, 154
 Грегори А. (Gregory A.) 31

- Грин В. (Green W.) 72
 Губерман Ш.А. 105
 Губкин И.М. 21, 39, 78, 144, 145, 148
 Гулин Ю.А. 99, 103, 107, 108, 111, 119
 Гуревич И.И. 12, 14, 77
 Дарвойд Г.Н. 101, 104
 Дарделл Дж. 120
 Дахнов В.Н. 8, 79, 114, 138, 140, 141, 154
 Дворкин И.Л. 103, 113, 114
 Деев Л.О. 108
 Денисик С.А. 88, 134, 139
 Денисик Ф.Ц. 138
 Джелепов В.П. 12
 Джемилев Р.А. 139
 Джоли Дж. (Joli J.) 6
 Добротин Н.И. 14
 Донов Г.М. 137
 Дорфман Я.Г. 8, 72
 Дядькин И.Г. 88, 99, 108, 110, 123, 133, 134
 Евсеенко М.А. 92
 Егоров А.В. 49
 Еремеев П. 9
 Ерозолимский Б.Г. 8, 87, 88, 92, 112, 114, 115, 118, 120, 121, 126, 129, 131, 135, 154, 155
 Ерчиковский Г.О. 17–19, 30
 Жемчужный С.Ф. 37
 Жолио-Кюри И. (Joliot-Curie I.) 71
 Жолио-Кюри Ф. (Joliot-Curie F.) 71
 Жувагин И.Г. 147, 157
 Забелин И.М. 8
 Заборовский А.И. 25, 75, 76, 133
 Запорожец В.М. 8, 131, 136, 137, 141, 147
 Захарченко В.Ф. 123, 132, 133
 Золотов Т.М. 114, 136
 Золотов А.В. 103
 Иванкин В.П. 103, 113, 115, 119, 157
 Ильина Т.Д. 4, 102, 152
 Иоффе А.Ф. 72
 Исаков А.И. 120
 Итенберг С.С. 79
 Казарновский М.В. 120
 Каламкарров В.А. 144
 Калицкий К.П. 20, 21, 35
 Кантор С.А. 8, 87, 88, 101, 104, 110, 113, 114, 119, 123, 131, 139
 Карлик Б. (Karlik B.) 46
 Карпинский А.П. 10, 153
 Карпов Л.Я. 12
 Карус Е.В. 135, 156
 Карцев А.А. 58, 59
 Кедров А.И. 139
 Келлог В. (Kellog W.) 30
 Кириков А.П. 19, 28, 30, 62–64
 Кищенко Ю.А. 138
 Кожевников Д.А. 8, 88, 105, 109, 110, 122, 123, 130, 133, 135
 Козин К.П. 140
 Кокшаров Н.И. 9
 Коловрат-Червинский Л.С. 12
 Комаров С.Г. 79, 119, 154
 Комлев Л.В. 13, 14, 37, 41–43, 51, 53–57
 Коновалов Д.П. 18
 Коноплев Ю.В. 138
 Коржев А.А. 88, 97, 98, 107, 112, 140, 141, 154, 155
 Косыгин А.И. 45
 Котульский В.К. 16
 Кук К.Л. 31
 Курбатов И.Д. 13, 30, 40, 42, 43
 Куриленко Ф.А. 129, 136, 138, 150, 152
 Курнаков Н.С. 37
 Курчатов И.В. 12, 14, 72, 74, 84, 154
 Кухаренко Н.К. 112, 154
 Кюри П. (Curie P.) 5
 Лаптев В.В. 148
 Лапук Б.Б. 78, 79, 83, 88, 92, 101, 104, 112, 154, 155
 Ларионов В.В. 105
 Лебедев В.Е. 58, 88
 Лейбензон И.Л. 74, 78, 79, 154
 Лейпунская Д.И. 8
 Лейпунский А.И. 12
 Лодочников В.Н. 15
 Ломакин А.А. 19, 39, 40
 Лукашук А.И. 13
 Лухминский В.Е. 134
 Любавин Ю.П. 139
 Лятковская Н.М. 8, 63, 64, 76, 77, 85, 154
 Маляров К.Л. 44
 Маурер Р. (Maurer R.) 23, 25
 Мелик-Нубаров Л. 35
 Меркулова М.С. 13, 43, 51, 54
 Мешеряков И.А. 148
 Мешеряков М.Г. 77
 Милин В.Б. 41
 Миллер В.В. 123, 138
 Минц А.З. 128
 Миронов С.И. 23, 35, 45
 Морозов Г.С. 140, 141
 Мури И.Д. 77
 Муслимов Р.Х. 137
 Мушкетов Д.И. 15

Мушкетов И.В. 30, 158
Мысовский Л.В. 12, 14, 19, 63
Мюльберг М. (Mülberg M.) 23, 24, 25

Недоступ Г.А. 123
Нелепо Б.А. 6
Ненадкевич К.А. 13
Нестеренко Н.Г. 136
Нещадимов Н.Н. 139
Никитин Б.А. 13, 41, 43, 51, 53–55
Никитин С.Н. 58
Никифоров П.М. 23
Никонов А.И. 64
Нумеров Б.В. 23
Нуриев Л.Н. 47

Оболенская А.В. 141
Овсянников О.Б. 129
Овчинников А.М. 46
Одиноков В.П. 112, 138
Опыхтина М.Н. 37
Орлинский Б.М. 114
Очкур А.П. 108

Паронджанов Д.Г. 79
Перрен Ж. (Perrin J.) 17
Петржак К.А. 77
Печерников В.Ф. 77, 88, 97, 98, 141, 154
Плахотник А.Ф. 8
Плешанова В.Г. 27
Полак Л.С. 28, 80, 81, 82, 88, 89, 91,
92, 95, 154, 155
Поляченко А.Л. 8, 88, 110, 132, 139
Понтекорво Б.М. 8, 71–74, 84, 154
Понятов Г.И. 134
Попов Н.В. 104, 116, 118, 123, 129,
138, 139
Потылицын Л.Н. 34, 35, 52
Порфирьев Б.Б. 45
Предит А.Т. 35
Прокопенко Н.М. 13, 14
Путкардазе Л.А. 138

Рамзай В. (Ramsay W.) 10
Раскин Р.М. 79
Рассел Ф. (Russel W.) 87
Рачинский М.З. 49
Резванов Р.А. 8, 88, 104, 110, 118, 132–
134, 139
Резерфорд Э. (Rutherford E.) 5, 10, 71
Рик Г.Р. 77
Роджерс Д. (Rögers G.) 37
Родия А.М. 129
Розе Г. 9
Романов В.В. 147
Рудык Б.М. 139
Рукавишников В.Н. 12, 77
Рыжанов 72

Савосин С.И. 129
Савченко В.П. 59
Сазонов Н.И. 113
Саламон В. (Salamon W.) 38, 50, 51
Самарцева А.Г. 13
Семихатов А.Н. 58, 59
Содди Ф. (Soddy F.) 5, 10
Сойфер В.Н. 49, 147
Соколов П.Т. 40
Соколов Ю.И. 136
Соловьев С.П. 13
Сребродольский Д.М. 8, 102, 118, 122,
124, 138, 139, 154
Старик И.Е. 14, 43, 44, 46, 47, 56, 57
Стиганд Я. (Stigand J.) 24
Столяров Г.А. 92
Стопневич А.Д. 58
Строцкий С.Г. 140
Сүлин В.А. 37, 45
Султанов Б. 45
Султанов С.А. 136, 137, 156
Сьестранд М. (Sjostrand M.) 120

Тагеева Н.В. 43, 56, 57
Тальянский И.И. 130, 132
Тверской П.Н. 19, 64
Тверцын В.С. 41
Титт С. (Tittle S.) 107
Толмачев П.И. 13
Топчиев А.В. 79, 92
Требин Ф.А. 77, 78
Трифонов Д.Н. 8
Трум А.Д. 138
Унковская В.А. 46

Фаас А.В. 15
Фаул Г. (Faul H.) 107
Федосеев И.А. 8, 59
Федынский В.В. 4, 8, 92, 119, 154
Ферми Э. (Fermi E.) 71, 74, 76, 85
Ферсман А.Е. 13
Филиппов Е.М. 108, 109, 156
Финкельштейн Я.Н. 147
Фирон Р. (Fearon R.) 72, 87
Флеров Г.Н. 8, 12, 74, 79, 92, 104, 112,
118, 120, 126, 146, 154, 155
Франк И.М. 120, 121
Фрош А. (Frosch A.) 68

Хавкин В.С. 123
Харичков К.В. 35
Хауелл Л. (Howell L.) 68
Хелмс Х. (Helms H.) 31
Химстедт Ф. (Himstedt F.) 20, 38
Хлопин В.Г. 11–14, 42, 43, 52, 62
Холин А.И. 8, 104, 114, 115, 156
Хорьков В.А. 136
Хуснуллин М.Х. 138

Циммерман С. 130
Цлав Л.З. 113, 139, 148, 151

Чердынцев В.В. 6, 14, 57
Черепенников А.А. 13, 23, 39, 40, 55
Чернышев Ф.Н. 153
Чураков А.Н. 15

Шапиро Д.Д. 136, 137, 148
Шапиро Ф.Л. 120, 121
Шимилевич Ю.С. 8, 101, 104, 116, 118,
120, 123, 135, 136, 138, 139
Школьников А.С. 118, 122, 128, 131,
138, 139

Шпак В.А. 64, 154
Шуф А.В. 77

Щепотьева Е.С. 13, 29, 56
Щербаков Д.И. 13, 18, 30
Эффендиев Г.Х. 47, 48, 57

Юдин В.А. 139
Юманс А. (Yomans A.) 130
Юсупов М.З. 138
Якубсон К.И. 88, 104, 115, 123

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I	
Зарождение методов ядерной геофизики (1920—1930 гг.)	9
Зарождение радиометрической съемки.	14
Первая радиометрическая съемка нефтяного месторождения.	20
Попытки создания радиоактивных методов разведки нефтяных месторождений.	22
Первые ускоренные методы лабораторных определений радиоактивности минералов и руд	26
Становление нового — радиометрического — направления поисков и разведки месторождений радиоактивных минералов и руд	29
Глава II	
Изучение радиоактивности нефтяных пластовых вод	33
Изучение состава нефтяных вод в 20-х годах	34
Открытие радиоактивных нефтяных вод в СССР.	39
Начало систематических исследований радиоактивности нефтяных пластовых вод.	41
Поиски возможных генетических связей радиеносных пластовых вод нефтяных месторождений.	44
Первые определения урана, тория и других радиоактивных элементов и изотопов в пластовых водах	46
Эволюция представлений о происхождении радиоактивности нефтяных пластовых вод.	49
Значение исследований состава пластовых и других природных вод в связи с открытием их радиоактивности	57
Глава III	
Начальный период исследования естественной радиоактивности горных пород нефтяных месторождений (1930—1940 гг.)	60
Некоторые предпосылки для создания производственных методов радиоактивного каротажа	62
Разработка первого метода радиоактивного каротажа нефтяных месторождений в СССР	64
Продолжение разработки первого советского метода гамма-каротажа иностранными фирмами	67
Глава IV	
Разработка первых производственных методов радиоактивного каротажа (1940—1950 гг.)	71
Начало применения нейтронной физики при исследовании нефтяных месторождений	—

Первые попытки создания приборов нейтронного каротажа в 1942–1947 гг.	74
Объединение научных усилий для использования достижений ядерной физики в нефтедобывающей промышленности	77
Поиски теоретических основ нейтронного каротажа.	84
Разработка опытных автоматических станций радиоактивного каротажа и первые геологические результаты их применения	88

Глава V

Создание сети производственных и научно-исследовательских организаций по радиоактивным методам исследования нефтяных скважин	97
Первые производственные партии РК на нефтяных промыслах	98
Признание радиоактивных методов обязательными при промыслово-геофизических исследованиях	100
Создание сети исследовательских организаций по радиоактивным методам	103

Глава VI

Становление методов нейтронного и гамма-нейтронного каротажа (1959–1960 гг.)	106
Развитие гамма-методов.	—
Развитие нейтронных методов	109
Первые гамма-спектрометрические методы	112
Исчерпаемость возможностей методов, использующих изотопные источники излучений	116

Глава VII

Разработка первых импульсных нейтронных методов исследования горных пород.	119
Возникновение принципиально нового подхода к изучению физических процессов взаимодействия нейтронов с горными породами	—
Установление связи состава и коллекторских свойств пластов с их нейтронными параметрами	122
Создание первых скважинных импульсных источников излучений	125
Формирование теории взаимодействия нейтронов с породами при импульсном нейтронном каротаже	130
Развитие импульсных нейтронных методов исследования нефтяных скважин	134

Глава VIII

Ядерно-физические методы в решении проблемы контроля за разработкой нефтяных месторождений	140
Применение радиоактивных изотопов для дефектоскопии скважин (1930–1950 гг.)	—
Постановка проблемы контроля за разработкой нефтяных месторождений (1940–1950 гг.)	144
Использование "меченой" жидкости при внедрении новых методов разработки (1950–1960 гг.)	146
Результаты использования стационарных нейтронных методов при наблюдении за обводнением скважин	148
Значение импульсных нейтронных методов в решении проблемы контроля за разработкой нефтяных месторождений.	150
Заключение.	153
Литература	159

Татьяна Дмитриевна И л ь и н а
РАЗВИТИЕ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ В СССР

*Утверждено к печати Институтом истории
естествознания и техники*

Редактор
Т. С. Б а р и н о в а
Художественный редактор
Т. П. П о л е н о в а
Технический редактор
Л. В. Р у с с к а я

ИБ № 7154

Подписано к печати 07.06.78. Т — 09253.

Усл.печ.л. 12,0. Уч.-изд.л. 14,5. Формат 60 x 90 1/16.

Бумага офсетная № 1. Тираж 850 экз. Тип. зак. 129.

Цена 2р.20к.

Книга издана офсетным способом

Издательство "Наука", 117485, Москва,
В-485, Профсоюзная ул., 94^а.

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука",
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

2 р. 20 к.

2825