

Молодым ученым

В.А. Лопата, канд. техн. наук

К истории рентгеновской томографии

То, что произошло с компьютерной томографией (КТ) за 35 лет ее существования, широко известно. Куда менее известно то, что положило ей начало. Рассказать об этом – цель автора статьи, убежденного в том, что технологическое достижение, удостоенное Нобелевской премии по медицине и физиологии, заслуживает внимания к его истории.

Сегодня термин «томография» вызывает образ чего-то очень современного и электронного. В действительности метод томографии, т.е. послойного изображения объекта, известен достаточно давно. В марте 1896 г., через три месяца после доклада Вильгельма Конрада Рентгена «Новый вид излучения: предварительное сообщение», появилась первая статья, которую предлагается признать попыткой изображения сечений [1] и от нее отсчитывать начало истории томографии.

Наиболее эффективный принцип томографии, основанный на простых принципах проективной геометрии, предложил в 1930 г. итальянский радиолог Алессандро Валлебона (A. Vallebona, 1899-1987).



Рис. 1. А. Vallebona – директор Института радиологии Университета Генуи

Метод формирования изображений, названный «стратиграфия», реализуется соединением рентгеновской трубки и кассеты с плёнкой с помощью жесткого штока. При экспозиции трубка и кассета синхронно перемещаются в противоположных направлениях относительно объекта. В результате на плёнке достигается сфокусированное изображение деталей объекта, распо-

ложенных в плоскости центра вращения системы, а изображения деталей вне этой плоскости «размываются». Изменением положения центра вращения томографической системы достигается сфокусированное изображение любого слоя исследуемого объекта. При необходимости получения изображений нескольких слоев объекта используется симультанная томография со специальной кассетой, в которой размещаются до пяти плёнок, разделённых прокладками. Экспозиция такой кассеты формирует серию томограмм слоев объекта, расстояние между которыми равняется толщине прокладок (1-2 см).

Период 1930-1940 г.г. дал неплохой урожай томографических новинок. Об их основных разновидностях – планиграфии (R. Pohl, G. Grossman) и ламинографии (J. Kieffer), – подробно рассказано в главе [1] «Ранние годы, 1895–1940». К тому же J. Kieffer в 1929 г. выполнил первые исследования по переходу к третьему измерению в томографии [3]. Этот период закончился созданием стратиграфа Валлебона и радиотома (С. Frain, F. Lacroix), представленных на рис. 2 и 3 [3].

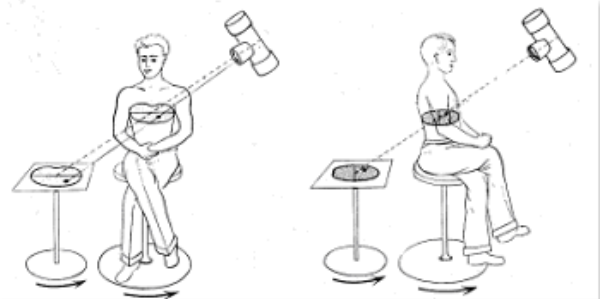


Рис. 2. Схема стратиграфа А. Vallebona (из патентной заявки, 1947 г.)

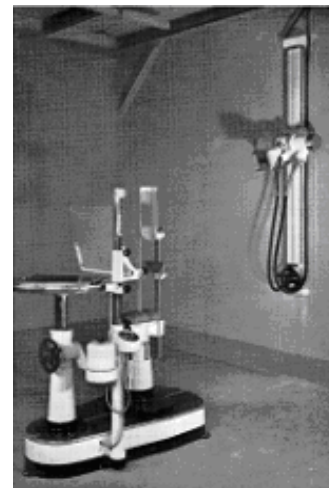


Рис. 3. Радиотом С. Frain, F. Lacroix

Принцип относительного движения в стратиграфии модифицирован – рентгеновская трубка неподвижна, а вращаются пациент и кассета с плёнкой. При необходимости выбора иной плоскости фокусирования регулируется высота посадки пациента. Такой же принцип неподвижности рентгеновской трубки реализован и в конструкции радиотома.

Следующим важным шагом в конструировании томографов стали изобретения S. Takahashi, который, начиная с 1946 г., разработал пять методов так называемой «ротатографии» [1]. Основой этих методов стало облучение пациента узким пучком рентгеновских лучей, проходящих через коллиматор и щель шириной 1 см (рис. 4).

Различия между методами состоят в режимах вращения пациента и кассеты с плёнкой при экспозиции – они могут быть непрерывными или прерывистыми.

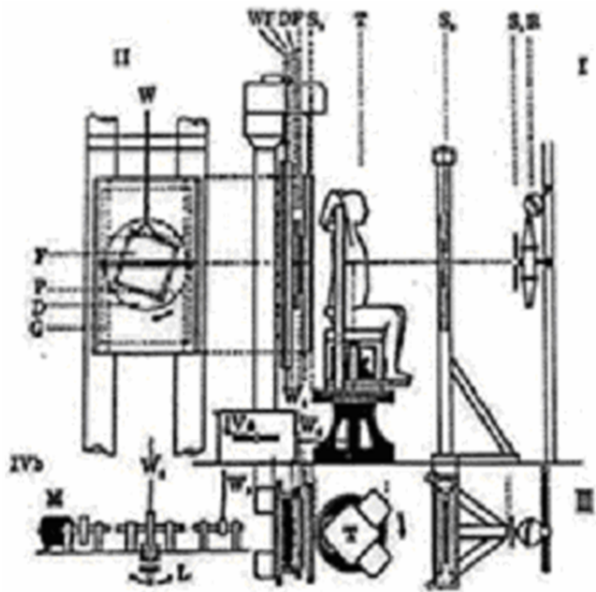


Рис. 4. Схема ротатографа S. Takahashi

Получаемые снимки (синограммы Takahashi) [1] называет «поперечно-осевыми томограммами обратной проекции» и утверждает, что если бы S. Takahashi имел возможность оцифровки своих синограмм и компьютер для их обработки, то смог бы создать «нефильтрованную» КТ.

Суммируя итоги 1930-1950 годов, [1] отдает должное пионерам метода, особо отмечая эксперименты S. Takahashi, которые «зачастую возобновлялись и повторялись десятилетия спустя другими исследователями», а [3] именуется работы G. Watson, E. Stevenson, M. Gebauer и перечисленных выше авторов, основой развития КТ.

Первым триумфом КТ стало присуждение Нобелевской премии по медицине и физиологии 1979 г. «За создание компьютерной томо-

графии» инженеру из Великобритании Годфри Хаунсфилду (Godfrey Newbold Hounsfield) и физику из США Аллану Кормаку (Allan McLeod Cormack).



G.N. Hounsfield (1919-2004)



A. McLeod Cormack (1924-1998)

«Томографическое исчисление» обосновал в 1917 г. австрийский математик Йоганн Радон (J.K.A. Radon), предложивший интегральное преобразование функции многих переменных, сходное преобразованию Фурье [4]. Важнейшее свойство преобразования — возможность восстанавливать исходную функцию по ее «следу».



J. Radon

Й. Радон (1887-1956)

Если $f(x,y)$ - функция двух действительных переменных, определённая на всей плоскости и

достаточно быстро убывающая на бесконечности, то ее преобразованием по Радону будет функция:

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz.$$

Представленное преобразование имеет геометрический смысл интеграла от функции вдоль прямой AA' , перпендикулярной вектору $\vec{n} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$ и проходящей на расстоянии S от начала координат, измеренном вдоль вектора \vec{n} .

Если линейка фотодетекторов измеряет поглощение объектом параллельного пучка рентгеновских лучей, то согласно закону Бугера-Ламберта-Бера интенсивность излучения, измеренная в точке S линейки пропорциональна

функции $\exp\{-\int_{AA'} dz \rho(x, y)\}$, где $\rho(x, y)$ - оптиче-

ская плотность объекта для данного типа излучения; z — координата на прямой AA' . Логарифм от интенсивности, взятый с обратным знаком, даёт преобразование Радона от оптической плотности. Вращением в одной плоскости системы из источника и детекторов излучения, вокруг объекта, или вращением объекта вокруг оси, перпендикулярной этой плоскости, получают полную информацию о величинах оптической плотности в срезе объекта, лежащем в этой плоскости. Обратное преобразование Радона позволяет восстановить параметры поглощения излучения в любой точке среза объекта.

Этот прием описывает руководитель проекта первого советского томографа И.Б. Рубашов, директор ВНИИ компьютерной томографии в 1987-1998 г.г. [6]: «Представьте себе ребенка у стола. Он настолько мал, что его глаза находятся на уровне края стола. Ребенок ходит вокруг стола, пытаясь разглядеть коробку конфет в середине. Для него это безнадежная задача - коробка надежно скрыта от его глаз другими предметами, стоящими на столе. Датчики томографа находятся в таком же положении, но он может решить эту задачу: благодаря могуществу математики объект можно как бы повернуть на 90° и увидеть сверху».

В [7] по поводу математических основ томографии сообщается следующее: «Данная задача на много лет была отложена в сторону, и лишь в 1956-58 гг. советские учёные Тетельбаум, Коренблюм и Тютин разработали первую систему реконструкции рентгеновских медицинских изображений». Аналогичную ссылку находим и в [1]: «В конце 1950-х годов известные ис-

следователи из Киева публикуют статьи, показывающие, что они решили обе теоретические проблемы компьютерной томографии и разработали экспериментальную установку для ее реализации».

Реферат этих статей [8,9] приводится ниже.

Выводы [8] формулируются так: «Указывается метод получения при помощи рентгеновского излучения пространственных изображений объекта. Может быть также получено изображение достаточно тонкого слоя объекта, не зависящее от характеристик прилегающих слоев. Показана принципиальная возможность определения при помощи проникающего излучения локального коэффициента поглощения в каждом элементе трехмерного изображения. Задача формулируется в виде интегрального уравнения. Указывается возможность получения объемных рентгеновских изображений и рентгенограмм тонких слоев. Рассматриваемый метод представляет перспективный интерес для рентгено- и гамма-дефектоскопии, а также для медицинской диагностики».

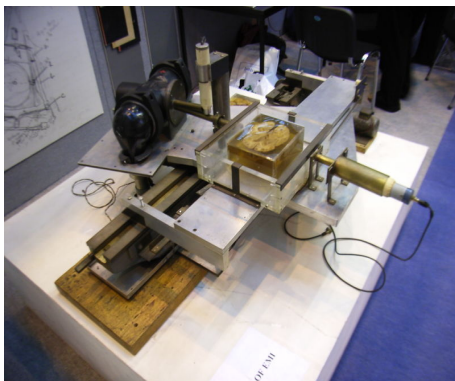
В [9] резюмируется: «Были предложены методы рентгенотехники, позволяющие определять значение локального ослабления рентгеновского излучения в каждом элементе трехмерного объекта и получить объемное изображение последнего. При равномерном вращении объекта вокруг оси, перпендикулярной исследуемому слою, на фотопленке, перемещающейся параллельно вдоль этой оси, получается рентгеношифрограмма, заключающая в себе данные, необходимые для получения изображения слоя. Счетно-решающее телевизионное устройство, осуществляющее аппаратное решение соответствующего интегрального уравнения, преобразует рентгеношифрограммы в изображение исследуемого слоя объекта». В статье определены основные параметры устройства: изображение слоя объекта, содержащее 10^4 элементов, может быть получено за время порядка 5 мин при частотной полосе тракта счетно-решающего устройства до 1 МГц. И главное — статья заканчивается словами: «В настоящее время в Киевском политехническом институте строится первая экспериментальная установка для получения рентгеновских изображений тонких слоев по описанной методике».

Дальнейших публикаций по теме нет, и мы, к сожалению, не знаем, чем закончилась эта давняя работа. Скорее всего, планируемый результат не был достигнут из-за трудностей технического характера. Как и в случае с преобразованием Радона, уравнения Коренблюма-Тетельбаума не воплотились в инженерное ре-

шение. Математический аппарат томографии еще не был востребован в ее «детские» годы. Ответ на то, почему так произошло, дает Хаунсфилд в своей Нобелевской лекции «Компьютерные медицинские изображения» [10]: «... я исследовал возможность восстановления с помощью компьютера изображения из множества очень точных рентгеновских измерений, полученных облучением тела со множества различных точек. Потребуется много сотен тысяч измерений, а восстановление изображения потребует одновременного решения равного количества – многих сотен тысяч уравнений». Инженерная задача не могла быть решена без доступного компьютера для выполнения огромного объема необходимых расчетов.

Из автобиографии, представленной Хаунсфилдом в Нобелевский комитет [11], следует, что в 1951 г., по окончании колледжа Faraday House, с дипломом инженера-электрика он стал сотрудником компании EMI (Electric and Musical Industries Ltd), занимаясь радиолокацией и управляемым вооружением. С началом разработки компьютеров Хаунсфилд возглавил группу, создавшую в 1958 г. первый транзисторный компьютер Великобритании, EMIDEC 1100. Когда эта работа была закончена, Хаунсфилд получил возможность «спокойно подумать о других областях исследований, которые могли бы быть плодотворными». Одно из предложений было связано с автоматическим распознаванием образов: «Когда я изучил преимущества такого метода по сравнению с обычной рентгенографией, стало очевидным, что традиционные методы не могут в полной мере использовать

всю информацию, получаемую при облучении. Расчеты показали, что можно использовать данные очень эффективно и чувствительность метода будет на два порядка выше по сравнению с обычным. Я надеялся, что можно будет выявлять различия между тканями организма, хотя не мог найти литературу, подтверждающую, что различия в поглощении рентгеновских лучей тканями существуют. Я решил проделать лабораторные эксперименты. Оборудование было самодельным – каретка токарного станка обеспечивала боковое сканирующее движение источника излучения, а детекторы были размещены по обе стороны от исследуемого объекта, который поворачивался на 1° к концу каждого прохода (рис. 5). 28000 измерений детекторов были оцифрованы. По завершении сканирования данные обрабатывались компьютером. Полученные изображения были обнадеживающими, хотя система работала медленно: сканирование занимало 9 часов, а обработка изображений на большом компьютере - 2,5 часа. В итоге мы получили первое изображение мозга, демонстрирующее его серое и белое вещество (рис. 5). Однако мы беспокоились относительно того, будут ли обнаруживаться опухоли. Если этого не произойдет, от машины будет очень мало пользы. Для проверки нам пришлось строить более сложные машины для сканирования мозга пациентов в клинике. В 1972 г. первым пациентом стала женщина с подозрением на поражение головного мозга, и сканирование показало кисту. С этого момента было обследовано большое количество пациентов, и стало очевидно, что машина достаточно чувствительна, чтобы обнаружить разницу между нормальной и патологической тканями» [10].



а



б

Рис. 5. Прототип сканера Хаунсфилда (а) и первое отсканированное изображение мозга (б)

В мемориальной статье [12] об этом периоде сказано так: «Начальная работа была проделана небольшой группой, включающей Godfrey Hounsfield, программиста Stephen Bates, электронщика Peter Langstone и механика Mel King, работавших при очень низком бюджете £ 25 000».

Так или иначе, в 1972 г. технология компьютерной томографии стала известна миру под первоначальным названием «EMI-сканирование».



Рис. 6. Исторический EMI-Scanner 1010

Первая презентация EMI-Scanner 1010 состоялась в Амстердаме, на 2-ом конгрессе Европейской Ассоциации радиологии (1971 г.), но не вызвала особого интереса. Возможно, потому, что многие радиологи Великобритании считали Хаунсфилда чудачком (из-за его убежденности в поразительных отличиях своего метода от других методов формирования рентгеновских изображений) и не стеснялись распространять это мнение, а известность EMI, как фирмы звукозаписи, способствовала недоверию к высокой медицинской технологии, разработанной ее сотрудниками [11].

Признание пришло 20 апреля 1972 г. на 32-ом конгрессе Британского Института радиологии. Его участники приветствовали доклад «Компьютерная аксиальная томография (новый метод демонстрации некоторых мягких тканей структур головного мозга без применения контрастных средств)». А 15 мая в Нью-Йоркском медицинском колледже им. А. Эйнштейна Хаунсфилд показал первые клинические снимки на курсах неврологии для аспирантов. Молодые люди хорошо поняли значение увиденного, и хотя их было всего около 10 человек, новость о КТ быстро распространилась.

Автор статьи настойчиво искал упоминание о какой-либо совместной работе Хаунсфилда и Кормака, пытаюсь понять, почему Нобелевский комитет присудил премию им обоим с общей формулировкой. Но, к сожалению, не нашел – ни в научной, ни в биографической литературе.

Аллан Маклеод Кормак родился в Йоханнесбурге (ЮАР). В школе его интересовали астрономия, математика и физика. В Университете Кейптауна перспектив стать астрономом не было, поэтому Аллан изучал электротехнику, в курсе которой было много физики и математики. Однако через пару лет он забросил инженерию и полностью обратился к физике.

Получив степень магистра, Кормак приезжает в Великобританию и работает исследователем в знаменитой Кавендишевской лаборатории Кембриджа, занимаясь проблемами сверхтекучести гелия.

О своем звездном часе Кормак сказал в Нобелевской лекции 8 декабря 1979 г. [14]:

«В 1955 году я был преподавателем физики в университете Кейптауна, когда штатный физик клиники Groote Schuur подал в отставку. Поскольку закон ЮАР требует, чтобы использование радиоизотопов контролировалось физиком, а я был единственным физиком-ядерщиком в Кейптауне, то мне в первой половине 1956 г. была предложена эта работа, в ходе которой я наблюдал планирование лучевой терапии. Сестра составляла изодозные карты, и каждый раз врач их рассматривал и корректировал, причем процесс повторялся до тех пор, пока не было найдено удовлетворительное распределение дозы. Эти изодозные карты составлялись для однородных материалов, но поскольку человеческое тело весьма неоднородно, то эти результаты могли быть искажены. Я решил, что в целях улучшения планирования терапии нужно знать распределение коэффициента затухания в тканях организма, и что такое распределение должно быть найдено измерениями. Вскоре я понял, что эта информация будет полезна для диагностических целей и может быть представлена в виде томограммы или серии томограмм, хотя и не знал этого термина на протяжении многих лет. В тому времени закон экспоненциального ослабления излучения был известен и использовался уже более 60 лет для случая однородного материала. Я предположил, что обобщение для неоднородных материалов было найдено за эти годы, но поиск литературы этого не подтвердил, и я был вынужден рассматривать эту математическую проблему с самого начала. В 1957 г. я начал экспериментировать с образцом - алюминиевым цилиндром,

заклученным в деревянном кольце. Работая с перерывами в течение шести лет, я получил, используя разложения Фурье, интегральные уравнения типа уравнений Абеля, но с более сложными ядрами».

Статьи, опубликованные в *Applied Physics* в 1963-64 гг., не вызвали отклика. Как и преобразование Радона, исследования Кормака в то время не были востребованы. Вот что говорит автор по этому поводу :

«Преподавание полностью занимало меня, так что я очень мало думал о предмете своих исследований до начала 70-ых. Только тогда я узнал о работах Радона и впервые услышал о Хаунсфилде и EMI-scanner. С 1972 г. я занялся проблемами, связанными с КТ-сканированием. Как можно восстановить функцию на плоскости, учитывая ее интегралы по всем направлениям? Может ли быть восстановлена функция для сферы из интегралов, определяющих пересекающие ее плоскости? На этот вопрос был получен ответ, и формула для нахождения функции оказалось проще, чем в случае двух измерений. Существует тесная связь между результатами Радона и нашими, так что мы в настоящее время пытаемся найти более общие решения проблемы Радона для семейства поверхностей. Что даст использование этих результатов? Ответ состоит в том, что я не знаю... Некоторые из них могут найти применение в изображениях с помощью ядерно-магнитного резонанса или ультразвука, но это еще ни в коей мере не ясно. Мы будем изучать эти темы, потому что они интересны в своем собственном качестве математических проблем. И это то, что составляет смысл науки».

Мало сказать, что мировая наука сохранит имена авторов КТ. Они уже навечно в списках лауреатов самой высокой и желанной научной премии. Имя Хаунсфилда, кроме того, присвоено внесистемной единице (НУ), определяющей плотность тканей на томографическом изображении [7]:

$$HU = \frac{\mu_x - \mu_w}{\mu_x} \cdot 1000,$$

где μ_x и μ_w - коэффициенты ослабления излучения веществом и водой (для кости, воды и воздуха величины равны 1000, 0, - 1000).

Появление первого компьютерного томографа (КТ), его неоспоримый успех, вызвали лавину аналогичных разработок многими группами и компаниями [15]. Результатом стала калейдоскопически быстрая смена поколений КТ. Если считать экспериментальную установку Хаунсфилда аппаратом 1-го поколения, то уже к 1980-ым годам специалисты насчитали 5

поколений [7,15]. А далее – мультиспиральная позитронно-эмиссионная, магниторезонансная, однофотонная, ультразвуковая томография... Но это уже совсем другая история.

А свою автор хотел бы закончить словами А. Кормака из единственного известного текста, созданного им совместно с сэром Годфри Хаунсфилдом – тоста на банкете Нобелевских лауреатов 10 декабря 1979 г. [16]:

«Ваше Величество, Ваши Королевские Высочества, дамы и господа! Годфри Хаунсфилд поручил мне выступить от нас обоих. Мы просили бы с огромным уважением, Ваше Величество, передать Нобелевскому фонду и Нобелевскому комитету Королевского Института нашу большую благодарность за честь, которую они оказали, наградив нас Нобелевской премией по медицине и физиологии. В этом есть ирония, поскольку ни Хаунсфилд, ни я не являемся врачами. Не будет большим преувеличением сказать, что все, что мы знаем о медицине и физиологии, можно записать на маленьком рецепте! Помимо этой иронии жива также надежда, что даже в наше время возрастающей специализации есть единство человеческого опыта, единство, хорошо понятое и показанное Альфредом Нобелем в широком спектре премий его имени. Я думаю, он был бы рад узнать, что инженер и физик, каждый на своем собственном пути, посодествовали небольшому прогрессу медицины».

Литература

1. *Webb S.* From the watching of shadows. The origins of radiological tomography // CRC Press, 1990. – 347 p.
2. http://books.google.com.ua/books?printsec=frontcover&id=1lkv7Y2a_8sC&hl=ru#PRA1-PA6,M1
3. http://www.aosp.bo.it/rad2/Rad/Notes/strati_tra_sv.htm
4. *J. Radon.* Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten // Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, bd. 29, s. 262-277, Leipzig, 1917.
5. http://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Радона
6. *И.Б. Рубашов.* Компьютерная томография. Научное сообщение. – Известия АН СССР, 1985, 4, 7, с. 47-61.
7. *Марусина М.Я., Казначеева А.О.* Современные виды томографии. – СПб., РИО СПб ГУИТМО, 2006. – 153 с.
8. *Тетельбаум С.И.* О методе получения объемных изображений при помощи рентгенов-

- ского излучения. – Известия Киевского орде- на Ленина политехнического института, 1957, т. XXII, с. 154-160.
9. *Коренблюм Б.И., Тетельбаум С.И., Тютин А.А.* Об одной схеме томографии. – Известия высших учебных заведений, 1958, 3, с. 151-157.
 10. http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/hounsfield-lecture.html
 11. http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/hounsfield-autobio.html
 12. *Beckmann E.C.* CT scanning: the early days. - The British Journal of Radiology, 2006, 79, 5–8
 13. [http://en.wikipedia.org/wiki/EMI_\(company\)](http://en.wikipedia.org/wiki/EMI_(company))
 14. http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/cormack-autobio.html
 15. *Goldman L.W.* Principles of CT and CT Technology. – J. Nucl. Med. Technol., 2007, 35, 115-128
 16. http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/cormack-speech.html