

**А. А. Стекольников, С. П. Ковалев,
М. А. Нарусбаева**

РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКА В ВЕТЕРИНАРИИ

Учебник

*Допущено Министерством сельского хозяйства
Российской Федерации в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по специальности
111801 «Ветеринария»*

Санкт-Петербург
СпецЛит
2016

УДК 619:616-073.75
С79

А в т о р ы:

Стекольников Анатолий Александрович — доктор ветеринарных наук, профессор, член-корреспондент РАН;

Ковалев Сергей Павлович — доктор ветеринарных наук, профессор;

Нарусбаева Марина Александровна — кандидат ветеринарных наук, доцент

Р е ц е н з е н т ы:

Зеленевский Николай Вячеславович — доктор ветеринарных наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии и физиологии НЧОУ ВПО «Национальный открытый институт», Санкт-Петербург, декан факультета биотехнологий;

Щипакин Михаил Валентинович — доктор ветеринарных наук, заведующий кафедрой анатомии животных, декан факультета ветеринарной медицины ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины»

Стекольников А. А.

С79 Рентгенодиагностика в ветеринарии : учебник / А. А. Стекольников, С. П. Ковалев, М. А. Нарусбаева. — Санкт-Петербург : СпецЛит, 2016. — 379 с. : ил.

ISBN 978-5-299-00759-6

Появление современных средств диагностики требует от практикующего врача более углубленных знаний, в первую очередь в рентгенологии. В связи с этим возникает необходимость иметь по данной дисциплине новый учебник.

В издании две части — общая и специальная. В общей приводятся основные сведения по физике рентгеновского излучения, рентгенотехнике, о рентгеновских аппаратах, а также методах и средствах рентгеновского исследования, компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии и ангиографии (интервенционной радиологии). В специальном разделе освещаются вопросы рентгенодиагностики различных систем и органов.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Ветеринария».

УДК 619:616-073.75

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
-------------------	---

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Глава 1. История развития ветеринарной рентгенологии	8
Глава 2. Физическая сущность и свойства рентгеновского изображения	14
Глава 3. Рентгеновская трубка	19
Глава 4. Безопасность рентгеновских исследований	26
Глава 5. Информативность рентгеновского изображения	32
5.1. Рентгеновское изображение	32
Глава 6. Технические условия съемки	49
Глава 7. Техника изготовления рентгеновского снимка	61
7.1. Обработка экспонированной пленки	63
7.2. Требования к снимку	65
Глава 8. Рентгеноскопия	67
Глава 9. Специальные методы в рентгенодиагностике	70
9.1. Флюорография	70
9.2. Томография	71
9.3. Компьютерная томография	72
9.4. Магнитно-резонансная томография	75
9.5. МР-спектроскопия	79
9.6. Рентгенокимография	79
9.7. Рентгенофотооссеометрия	80
9.8. Стереорентгенография	81
9.9. Рентгенокинематография	81
9.10. Использование телевидения в рентгенодиагностике	81
9.11. Искусственные контрасты, применяемые при рентгенологических исследованиях	81
Глава 10. Рентгенологические аппараты	85
10.1. Организация ветеринарного рентгеновского кабинета	88
Глава 11. Методы определения местоположения инородных тел	90
11.1. Метод рентгенографии в двух проекциях	91

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Глава 1. Голова	96
1.1. Общие замечания	96
1.2. Стандартные укладки при рентгенографическом исследовании головы	96
1.3. Болезни в области головы	104
1.3.1. Врожденные заболевания	104
1.3.2. Метаболические заболевания	107
1.3.3. Неоплазия (опухоль) в области головы	108
1.3.4. Инфекционные заболевания в области головы	114
1.3.5. Болезни зубов	118
1.3.6. Другие заболевания в области головы	120
1.3.7. Травмы в области головы	121

Глава 2. Грудная клетка	122
2.1. Укладки и проекции	122
2.2. Техника съемки	125
2.3. Болезни в области грудной клетки	126
2.3.1. Заболевания в области грудной стенки и диафрагмы	126
2.3.2. Заболевания плевральной полости и трахеи	135
2.3.3. Болезни пищевода	148
2.3.4. Болезни сердца	157
2.3.5. Болезни легких	166
Глава 3. Брюшная полость	180
3.1. Рентгенологическая картина брюшной полости без патологий: используемые проекции	182
3.2. Рентгенологическая картина некоторых патологий в брюшной полости ...	187
3.2.1. Перитонеальная жидкость в брюшной полости	187
3.2.2. Объемные образования в брюшной полости (абдоминальные массы)	189
3.2.3. Краниальные массы	191
3.2.4. Дорсальные массы	192
3.2.5. Каудальные массы	192
3.2.6. Вентральные массы	193
3.2.7. Центральные массы	194
3.3. Печень, селезенка, поджелудочная железа, лимфатические узлы	195
3.3.1. Печень	195
3.3.2. Селезенка	203
3.3.3. Поджелудочная железа	205
3.3.4. Лимфатические узлы брюшной полости	206
3.4. Пищеварительный тракт: желудок, тонкий кишечник, толстый кишечник ..	207
3.4.1. Желудок	208
3.4.2. Тонкий кишечник	221
3.4.3. Толстый кишечник	227
3.5. Мочевыделительная система (почки, мочеточник, мочевого пузырь, уретра) ..	232
3.5.1. Почки	233
3.5.2. Мочевого пузырь	237
3.5.3. Исследование мочевыделительной системы с контрастированием ...	238
3.5.4. Заболевания мочевыделительной системы	246
3.6. Репродуктивная система самок и самцов	262
3.6.1. Репродуктивная система самок. Яичники, матка, влагалище. Беременность	262
3.6.2. Репродуктивная система самцов	268
Глава 4. Опорно-двигательный аппарат	272
4.1. Нормальная лучевая анатомия органов опоры и движения	272
4.2. Возрастные изменения костей скелета	275
4.3. Общая лучевая семиотика патологических изменений в костях и суставах ..	278
4.3.1. Кости	279
4.3.2. Процессы, приводящие к уменьшению (исчезновению) костной ткани ..	279
4.3.3. Процессы, приводящие к увеличению костной ткани	283
4.3.4. Надкостница	285
4.3.5. Суставы	289

4.3.6. Изменение рентгенологической суставной щели	289
4.3.7. Костные «губы»	290
4.3.8. Нарушение пространственных соотношений в суставах	291
4.4. Болезни суставов и костей	292
4.4.1. Заболевания скелета у молодых животных	292
4.4.2. Врожденные заболевания суставов	306
4.4.3. Болезни костей	317
4.4.4. Заболевания скелета взрослых собак	325
4.5. Травматические повреждения костей	338
4.5.1. Переломы костей и их классификация	338
4.5.2. Вывихи и подвывихи	344
Глава 5. Позвоночник	346
5.1. Рентгенологическое исследование позвоночника	346
5.1.1. Интерпретация рентгенограмм позвоночника	350
5.2. Болезни позвоночника	350
5.2.1. Врожденные заболевания позвоночника	350
5.2.2. Дегенеративные заболевания позвоночника	358
5.2.3. Синдром Воблера	363
5.2.4. Синдром «конского хвоста»	364
5.2.5. Воспалительные заболевания позвоночника	366
5.3. Травмы позвоночника	367
5.4. Опухоли позвоночника	371
5.5. Другие заболевания позвоночника	372
5.5.1. Гипервитаминоз А кошек	372
5.5.2. Гиперпаратиреоз (ювенильный остеопороз)	373
5.6. Миелография	374
5.6.1. Интерпретация миелограммы	375
Литература	379

Предисловие

Последние десятилетия ознаменовались внедрением в практику врача ветеринарной медицины современных достижений научно-технического прогресса. Появилась возможность с помощью новых приборов, методик быстро и надежно ставить диагноз больным животным. Современные средства диагностики требуют от практикующего врача более углубленных знаний, в первую очередь — в рентгенологии. Более чем за 100-летнюю историю использования в гуманной и ветеринарной медицине рентгенодиагностики специалистами открыты новые возможности этого метода. Сегодня ветеринария активно использует новейшие методы исследования — компьютерную рентгенографию, компьютерную томографию и магнитно-резонансную томографию.

В ветеринарных, вузовских журналах, материалах конференций можно встретить многочисленные публикации современных исследователей по различным вопросам ветеринарной рентгенологии.

Значительно возросшие технические возможности при диагностике заболеваний у животных диктуют необходимость систематизации и обобщения многочисленного практического материала по ветеринарной рентгенодиагностике, в связи с чем возникает необходимость в новом учебном издании по данной дисциплине.

В книге имеются две части — общая и специальная.

В общей части приводятся основные сведения по физике рентгеновского излучения, рентгентехнике, о рентгеновских аппаратах, а также методах и средствах рентгеновского исследования, компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии и ангиографии (интервенционной радиологии).

В специальной части освещаются вопросы рентгенодиагностики различных систем и органов.

Издание рекомендуется в качестве учебника для студентов факультетов ветеринарной медицины. Книга будет полезна и для специалистов ветеринарии в качестве практического руководства.

Общая часть

Глава 1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВЕТЕРИНАРНОЙ РЕНТГЕНОЛОГИИ



Рентген Вильгельм Конрад
(1845—1923)

Начало использования рентгентехники относится к XIX в., когда успехи биологии, физики, химии и других наук помогли медицине найти более эффективные способы распознавания и лечения болезней. Особый вклад в развитие медицины внесло открытие рентгеновских лучей, которое совершило настоящую революцию в диагностике различных заболеваний у человека и животных.

Первые сообщения об открытии X-лучей (так на первых этапах называли рентгеновские лучи) принадлежат Ивану Павловичу Пулюю, который за 15 лет до В. К. Рентгена начал интересоваться разрядами в вакуумных трубках. Ученым было установлено, что лучи, появляющиеся при работе сконструированной им трубки, проникают через непрозрачные предметы, отображаются на светящихся экранах, засвечивают фотопластинки. Вакуумная трубка Пулюя была оснащена системой питания электрическим током — прообраз современных рентгеновских аппаратов.

В 1880—1882 гг. он подробно описал видимые катодные лучи. Некоторое время серийно выпускалось устройство, известное как «лампа Пулюя», представлявшее собой газоразрядную лампу. В 1883 г. им был опубликован труд: «Сияющая электронная материя и четвертое состояние вещества» (Strahlende



Пулюй Иван Павлович
(1845—1918)

Elektrodenmaterie und der sogenannte vierte Aggregatzustand. — Wien : Verlag Carl Gerold Sohn, 1883). К 1890 г. И. П. Пулюй получил фотографии скелета лягушки, руки своей дочери с булавкой, сломанной руки подростка, называемые теперь рентгенограммами. Серия рентгенограмм органов человека, выполненная И. П. Пулюем, была настолько четкой, что позволила выявить патологические изменения в телах пациентов. Снимки были опубликованы в научных журналах Европы. В. К. Рентгену работы И. П. Пулюя были известны из уст самого исследователя — оба трудились какое-то время вместе в лаборатории профессора А. Кундта в Страсбурге. Кроме того, В. К. Рентген переписывался с И. П. Пулюем и поэтому был хорошо информирован о его исследованиях, он видел и снимки, сделанные нашим академиком.

Занимался вопросами X-лучей и Никола Тесла. В 1887 г. он в дневниковых записях зафиксировал результаты исследования рентгеновских лучей и испускаемое ими тормозное излучение, однако ни Тесла, ни его окружение не придали серьезного значения этим наблюдениям. Кроме этого, уже тогда Тесла предположил опасность длительного воздействия рентгеновских лучей на человеческий организм.

Однако приоритет открытия данного явления принадлежит В. К. Рентгену. 8 ноября 1895 г. началась рентгенологическая эра в медицине. Именно в этот день профессор Вюрцбургского университета В. К. Рентген, проводя опыты по изучению прохождения тока высокого напряжения через трубку Крукса — Гитторфа (рис. 1), обнаружил неизвестные лучи, которые вызывали свечение экрана, покрытого платино-синеродистым барием. В течение семи недель В. К. Рентген интенсивно работал над изучением свойств этих лучей, и 28 декабря 1895 г. в «Известиях Вюрцбургского физико-медицинского общества» появилась статья «О новом роде лучей». На заседании Вюрцбургского физико-медицинского общества 23 января 1896 г. профессор В. К. Рентген впервые публично сообщил о своем открытии. Выступивший в конце заседания известный анатом Келликер предсказал большое значение открытия Рентгена для естественных наук и для медицины и предложил назвать новое излучение рентгеновскими лучами (в России лучи стали называть рентгеновскими по инициативе ученика В. К. Рентгена — Абрама Федоровича Иоффе).

Как выяснилось вскоре, «лампа Пулюя» также являлась источником этого излучения. И. П. Пулюй внес большой вклад на первом этапе исследования рентгеновских лучей, поскольку конструкция разработанных им осветительных катодных трубок была удобна для использования в качестве рентгеновских источников (в частности, этому способствовало наличие антикатада). Так, статья И. П. Пулюя о происхождении рентгеновских лучей и их фотографическом действии была подана в Доклады Венской академии наук уже 13 февраля 1896 г. В январе 1896 г. И. П. Пулюй сделал ряд качественных рентгеновских фотографий (рентгенография застреленной морской свинки опубликована 31 января 1896 г.), в феврале того же года он провел публичную демонстрацию новых лучей и сделанных с их помощью фотографий различных частей тела человека и предметов в футлярах. И. П. Пулюй первым обнаружил появление электропроводности в газах, облучаемых рентгеновскими лучами, и был одним из физиков-первооткрывателей, показавших возможность исполь-

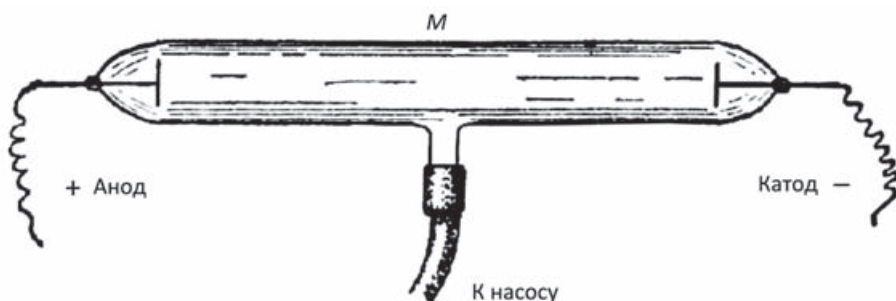


Рис. 1. Газоразрядная трубка

зования этих лучей в медицинской диагностике. И первым же сделал снимок человеческого скелета целиком. Изучением свойств катодных лучей занимался и другой немецкий физик — Ф. Э. А. Ленард, ученик Г. Герца. Он исследовал способность катодных лучей проникать через тонкие слои металлов. Им было показано в эксперименте почернение фотопластинки под воздействием этих лучей. Однако он не осознал значения сделанного им открытия и не опубликовал своих результатов.

После изобретения в 1892 г. разрядных трубок, названных его именем (трубок Ленарда), а также окошка Ленарда впервые появилась возможность изучать катодные лучи независимо от газового разряда. Эксперименты Ленарда привели к прояснению корпускулярной природы катодных лучей, хотя, к великому огорчению немецкого физика, приоритет в открытии электрона отошел в 1897 г. Дж. Дж. Томсону. Одну из изобретенных им разрядных трубок из собственного лабораторного оснащения Ленард передал В. К. Рентгену. При помощи этой трубки Рентген смог открыть в 1895 г. рентгеновские лучи и изучить их основные характеристики. В. К. Рентген занимался X-лучами немногим более года (с 8 ноября 1895 г. по март 1897 г.) и опубликовал о них три статьи, в которых было исчерпывающее описание свойств новых лучей. Впоследствии сотни работ его последователей, опубликованных затем на протяжении 12 лет, не могли ни прибавить, ни изменить ничего существенного. Рентген, потерявший интерес к X-лучам, говорил своим коллегам: «Я уже все написал, не тратьте зря время».

Открытие Рентгена вызвало огромный интерес в научном мире. Его опыты были повторены почти во всех лабораториях мира. В Москве их повторил П. Н. Лебедев. В Петербурге изобретатель радио А. С. Попов экспериментировал с X-лучами. Уже в январе 1896 г. им была изготовлена первая рентгеновская трубка, на основе которой изготовлен первый отечественный рентгеновский аппарат. Результаты своих исследований, полученные рентгенограммы он демонстрировал на публичных лекциях. В это же время в Императорской Военно-медицинской академии начальник кафедры физики профессор Н. Г. Егоров также изготовил образец рентгеновского аппарата и продемонстрировал профессорам и студентам рентгеновские снимки верхних конечностей человека, а также показал способ получения рентгенограмм. Поэтому наши ученые А. С. Попов и Н. Г. Егоров считаются первыми в России проводниками физикотехнических положений открытия Рентгена. Благодаря усилиям Н. Г. Егорова в 1897 г. слушателям Императорской Военно-медицинской академии начали преподавать основы рентгенологии.

В 1896 г. С. С. Лисовский применил рентгеновские лучи для просвечивания собаки. Более обстоятельные исследования провел в 1899 г. профессор Харьковского ветеринарного института М. А. Мальцев. Помимо просвечивания им были сделаны снимки головы, шеи и конечностей собаки, плюсны и пута лошади, пясти коровы. Для фиксации животных был применен наркоз. В том же году результаты своих исследований Мальцев опубликовал в «Архиве ветеринарных наук».

Интерес к свойствам рентгеновских лучей и их влиянию на биологические объекты по всему миру был огромный, уже в 1896 г. исследователями было выполнено около 1000 научных работ.

В 1912 г. сотрудники Харьковского ветеринарного института собрали рентгеновскую установку, которую использовали для определения переломов костей, вывихов, плодов у мелких беременных животных, для обнаружения инородных тел.

Систематические исследования в области ветеринарной рентгенологии в нашей стране относятся к 1923 г., когда в ветеринарных институтах Казани (Г. В. Домрачев) и Петрограда (А. И. Вишняков) были созданы рентгенологические кабинеты для исследования в основном мелких животных. На первых этапах для этих целей использовались медицинские рентгеновские аппараты, поскольку для ветеринарии приборы еще не изготавливались. В 1927 г. ленинградский завод «Буревестник» организовал серийный выпуск отечественных рентгеновских аппаратов для медицинских учреждений.

Первые отечественные рентгеновские аппараты для ветеринарных целей появились только в 1931 г. Заводы по производству рентгенотехники начали выпуск аппаратов для исследования мелких и крупных животных, что позволило открыть в Ленинградском, Казанском и Харьковском ветеринарных институтах рентгенологические кабинеты, здесь готовились кадры ветеринарных рентгенологов. Казанская школа в основном разрабатывала вопросы рентгенодиагностики заболеваний внутренних органов домашних животных; ленинградская решала преимущественно вопросы рентгенодиагностики костно-суставных заболеваний.

Первое руководство по ветеринарной рентгенологии М. Вейзера было издано в 1923 г., в нем обобщался материал по более ранним публикациям. В 1926 г. П. Генкельс подготовил следующее руководство по ветеринарной рентгенологии, в нем были представлены многочисленные рентгенограммы.

Важный вклад в становление ленинградской школы рентгенологов внес Алексей Иванович Вишняков, окончивший в 1926 г. ЛВИ, а затем и физико-математический факультет ЛГУ. В 1931 г. им была издана первая отечественная книга по рентгенодиагностике: «Основы ветеринарной рентгенологии». Автор адресовал монографию широкому кругу ветеринарных специалистов-рентгенологов. Здесь были приведены литературные данные и материал, полученный автором, по методике рентгенологических исследований и рентгеновской картины различной патологии у животных, в первую очередь патологических процессов хирургического характера. В это же время из Ленинградского ветеринарного института выходят оригинальные научные работы: «Рентгенометрический метод определения дислокаций копытной кости», «Метод дозированной пневматизации желудка свиней и собак для исследования печени», «Рентгенодиагностика болезней холки лошадей», «Исследование сесамовидных костей», «Исследование ревматического воспаления копыт» и многие другие.

В учебнике А. В. Синева «Клиническая диагностика внутренних болезней домашних животных», изданном в 1935 г., одна из глав, написанная А. И. Вишняковым, посвящена ветеринарной рентгенодиагностике. В книге А. Ю. Тарасевича (1939) «Хромоты сельскохозяйственных животных» А. И. Вишняковым также представлен раздел по рентгенодиагностике.

С 1931 г. в Ленинградском ветеринарном институте функционировала кафедра физики с основами рентгенологии и физиотерапии (заведующий кафедрой доцент А. И. Вишняков). В 1938 г. благодаря усилиям Вишнякова в Ленин-

градском ветеринарном институте создается первая самостоятельная кафедра ветеринарной рентгенологии, и были открыты постоянно действующие курсы по подготовке ветеринарных рентгенологов.



Вишняков Алексей Иванович
(1898—1942)

В 1940 г. А. И. Вишняковым издан первый отечественный учебник «Ветеринарная рентгенология». В нем автор раскрывал вопросы рентгенофизики, рентгентехники, приводил обширный и систематизированный материал по применению рентгенодиагностики и рентгенотерапии при различных заболеваниях животных. В течение почти 30 лет этот учебник служил основным руководством для студентов и ветеринарных специалистов.

Значительный вклад в рентгенодиагностику заболеваний конечностей животных внесли ветеринарные хирурги ленинградской школы. Большую роль в развитии ветеринарной рентгенологии сыграли работы А. И. Вишнякова и его многочисленных учеников, в числе которых следует отметить В. А. Никанорова, П. С. Терентьева, В. С. Захарова, В. А. Липина и др. Обширный материал по сравнительной рентгеноанатомии у сельскохозяйствен-

ных животных был собран и систематизирован Г. Г. Воккен и его учениками (С. А. Тарасовым, Н. И. Афанасьевым, А. А. Котельниковым, М. В. Пастуховым, В. И. Подгорным и др.). Следует также отметить работы А. А. Веллера, Л. А. Крутовского, проводивших исследования по определению места и глубины залегания инородных предметов.



Воккен Ганс Гансович
(1906—1971)

В 1960—1990-е гг. накапливался и публиковался материал по разным аспектам ветеринарной рентгенологии. Так, рентгеноанатомические и клинично-рентгенологические исследования в области оленеводства, пушного звероводства и других прикладных отраслях животноводства проводили А. Х. Лайшев, Н. М. Лебедева, В. Б. Наконечников. Исследования Г. В. Домрачева, И. Г. Шарабрина, Н. З. Обжорина, Е. И. Липина и других специалистов позволили с позиций рентгенодиагностики контролировать минеральный обмен у сельскохозяйственных животных. В этот период в ветеринарную практику активно внедряется флюорографический метод исследования. Работы Р. Г. Мустакимова, М. Х. Шайхаманова, И. Л. Рудакова, Р. М. Зинатуллина, А. И. Бухтиярова, В. П. Иванова, Н. Н. Шарпова и других специалистов, посвященные

изучению методических вопросов флюорографического исследования животных, позволили с новых позиций подойти к диагностике болезней органов дыхания крупных и мелких животных.

В 1966 г. В. А. Липин, М. Т. Терехина и А. Л. Хохлов, а в 1970 г. В. П. Литвинов издают очередные учебные пособия по вопросам ветеринарной рентгенологии. В 2006 г. коллективом авторов московской и ленинградской школ ветеринарных диагностов подготовлен учебник «Клиническая диагностика с рентгенологией» (Воронин Е. С., Сноз Г. В., Васильев М. Ф., Ковалев С. П., Черкасова В. И., Шабанов А. М., Щукин М. В.). Материал по рентгенологическому исследованию животных в свои издания включают и другие авторы учебных и методических пособий.

В ветеринарных журналах, трудах вузов, материалах конференций можно встретить многочисленные публикации современных исследователей по различным вопросам ветеринарной рентгенологии (Митина В. Н., Налетовой К. Н., Нарусбаевой М. А., Сахно А. В., Самошкина И. Б., Слесаренко Н. А., Стекольников А. А., Телятникова А. В., Тимофеева С. В., Федорова А. Н., Щукина М. В., Ягникова С. А. и многих других). В последнее время ветеринарная рентгенология переживает новый качественный уровень своего развития: научные сотрудники и практикующие врачи ветеринарной медицины активно используют новейшие методы исследования — компьютерную рентгенографию, компьютерную томографию и магнитно-резонансную томографию.

Значительно возросшие технические возможности при диагностике заболеваний у животных диктуют необходимость систематизации и обобщения многочисленного практического материала по ветеринарной рентгенодиагностике.



Домрачев
Георгий Владимирович
(1894—1957)

Глава 2

ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ И СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рентгеновское излучение — это квантовое электромагнитное излучение, возникающее при резком торможении ускоренных электронов в момент их столкновения с атомами вещества анода рентгеновской трубки (тормозное излучение) или при перестройке электронных оболочек ядра (характеристическое излучение).

Физическая сущность рентгеновских лучей подобна другим видам электромагнитных колебаний (видимый свет, инфракрасные, ультрафиолетовые лучи, радиоволны и др.). Различие всех электромагнитных колебаний состоит лишь в длине волны (табл. 1). Длина волны рентгеновского излучения измеряется в нанометрах (нм).

Таблица 1

Длина волн различных видов электромагнитных излучений

Вид излучения	Длина волны
Космические лучи	$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ нм
γ -лучи радиоактивных элементов	$1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$ нм
Рентгеновские лучи	$3 \cdot 10^{-3} - 1,5$ нм
Ультрафиолетовые лучи	1,5—400 нм
Видимый свет	400—700 нм
Инфракрасные лучи	700—0,15 см
Радиоволны	0,15 см—30 км

Рентгеновские лучи имеют очень малую длину волны, но большую частоту колебаний, поэтому невидимы человеческим глазом. Тормозное рентгеновское излучение представляет собой фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при изменении кинетической энергии заряженных частиц. Интенсивность тормозного рентгеновского излучения, или плотность потока энергии, распределена по всем частотам до высокочастотной границы, на которой энергия фотонов (граничная энергия) равна энергии бомбардирующих электронов.

При некоторой энергии электронов кроме тормозного рентгеновского излучения с непрерывным спектром возникает характеристическое рентгеновское излучение с дискретным спектром, которое появляется при изменении энергетического состояния атомов. В случае, когда электрон или квант тормозного рентгеновского излучения выбивает электрон внутренней оболочки (K -, L -, M -уровни) атома, то последний переходит в возбужденное состояние. Электроны с внешних слоев, с меньшей энергией связи стремятся заполнить освободившееся место в оболочке атома, что переводит атом в нормальное состояние, и при этом им испускается квант характеристического излучения с энергией, равной разности энергии на соответствующих уровнях. Если энер-

гия связи электрона в атоме на каком-то из внутренних уровней энергии, с которого отрывается электрон, при возбуждении равна W_1 , а на уровне, с которого электрон переходит на освободившееся место, — W_2 , то квант энергии характеристического излучения будет равен:

$$h\nu = W_1 - W_2. \quad (1)$$

Отсюда следует, что энергия электрона или кванта, возбуждающая атомы, должна превышать энергию связи электрона на соответствующем уровне. Для этого на рентгеновскую трубку подается соответствующее напряжение, которое необходимо потенциалу возбуждения.

В отличие от непрерывного спектра тормозного рентгеновского излучения длины волн характеристического излучения имеют вполне определенные значения для конкретного материала, из которого состоит анод.

Поскольку рентгеновское излучение, проходя через вещество, взаимодействует с ним, то интенсивность излучения убывает. Так, например, бесцветное и прозрачное для видимого света свинцовое стекло практически полностью поглощает рентгеновские лучи и поэтому используется для радиационной защиты. Величина уменьшения интенсивности рентгеновского излучения пропорциональна начальной его интенсивности и толщине слоя вещества:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2)$$

где I — измененная интенсивность пучка излучения после прохождения вещества; I_0 — изначальная интенсивность пучка излучения; e — элементарный заряд (заряд электрона); μ — линейный коэффициент ослабления, зависящий от длин волн излучения, свойств среды, через которую проходит излучение, и показывающий относительное уменьшение интенсивности излучения на единице толщины поглотителя (1/см); x — толщина слоя вещества.

Поскольку линейный коэффициент ослабления зависит от плотности среды, то для характеристики ослабления пользуются массовым коэффициентом ослабления μ_m (см²/г), который не зависит от плотности вещества ρ . Массовый коэффициент ослабления равен отношению линейного коэффициента ослабления к плотности среды и показывает относительное уменьшение интенсивности излучения при прохождении слоя вещества, содержащего массу, равную 1 г, на площади 1 см², т. е.:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}. \quad (3)$$

В таком случае формула ослабления интенсивности излучения с массовым коэффициентом приобретает следующий вид:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x}. \quad (4)$$

При использовании массового коэффициента ослабления μ_m толщину поглотителя ρx выражают в г/см². Эта условная толщина определяется делением массы вещества (г) на площадь (см²). Аналогично массовому коэффициенту ослабления вводят атомный μ_a и электронный μ_e коэффициенты ослабления. При этом атомный коэффициент ослабления (см²/атом) равен:

$$\mu_a = \frac{\mu Z}{\rho N_0} = \mu_m \frac{Z}{N_0}, \quad (5)$$

Учебное издание

Стекольников Анатолий Александрович,
Ковалев Сергей Павлович,
Нарусбаева Марина Александровна

РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКА В ВЕТЕРИНАРИИ

Учебник

Редактор *Закревская Е. Г.*
Корректор *Терентьева А. Н.*
Дизайн и компьютерная верстка *Илюхиной И. Ю.*

Подписано в печать 29.08.2016. Формат 70 × 100 ¹/₁₆.
Печ. л. 24 + 2,25 печ. л. цв. вкл. Тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «Издательство „СпецЛит“».
190103, Санкт-Петербург, 10-я Красноармейская ул., 15,
тел./факс: (812) 495-36-09, 495-36-12,
<http://www.speclit.spb.ru>

Первая Академическая типография «Наука»
199034, Санкт-Петербург, 9-я линия, 12/28