НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИИ

Дж. Эггерт, Лейпциг *

Значение инфракрасной фотографии как вспомогательного средства в научном исследовании в техническом испытании материалов основано на двух замечательных свойствах инфракрасных лучей: 1) на свойстве их благодаря большим длинам волн менее рассеиваться в мутных средах, чем видимый свет, и 2) на том факте, что вещества, кажущиеся по окраске и яркости в видимом свете вполне одинаковыми, зачастую в различной степени поглощают инфракрасный свет, вследствие чего их изображения на снимке, полученные в инфракрасных лучах, обнаруживают неодинаковое потемнение. Способность инфракрасных лучей проникать через насыщенную испарениями атмосферу находит себе практическое применение уже ряд лет в телефотографии. Известно также, что очень многие предметы в очувствленных к инфракрасным лучам фотографических слоях могут давать совершенно другие соотношения интенсивностей, чем для ощущений человеческого глаза (примером может служить чрезвычайно разнообразная передача зеленой листвы на снимках пейзажей в инфракрасном свете). Однако это последнее свойство до сих пор применялось очень редко. В следующих разделах, где описаны новые применения инфракрасной фотографии, будет подробно рассмотрена эта специфическая передача красок различного сорта на инфракрасных снимках.

I. Применение инфракрасной фотографии в графической промышленности

На рис. 1 изображены фотографии нескольких образцов пигментных красителей, отпечатанных в виде „клиньев" по густоте своей окраски, т. е. каждый отпечаток начинается наиболее густой окраской вверху, которая постепенно переходит в белый цвет подложки внизу.[1] Эти клинья сняты в белом свете на пластинках „Agfa — Superpan" и в инфракрасном свете в двух различных по длинам волн областях его. Первый снимок получен на пластинках Агфа „750 рапид" с черным фильтром Агфа № 83 и охватывает область от 720 до 780 mμ. Для второго снимка были использованы инфракрасные пластинки Агфа „850 рапид" с черным светофильтром Агфа № 85, что дало возможность охватить область 840—900 mμ. Образцы красителей были подобраны таким образом, чтобы пары рядом лежащих отпечатков, получающихся в инфракрасном свете совершенно различными, в видимом свете казались бы по возможности одинаковыми. Можно заметить, что красители 2, 5, 7, 9 и 11 отчасти уже на первом инфракрасном снимке и уже вполне на втором кажутся значительно более слабыми (светлыми), чем на снимке, произведенном в видимом свете, и поэтому резко отличаются от своих партнеров, кажущихся одинаково окрашенными в видимом свете. Это значит, что некоторые красители сильнее пропускают инфракрасные лучи с возрастанием длины волны, так как мы

* Naturwiss. **23**, 281, 1935, перевод А. А. Ильиной.

видим, что белая бумага, на которой находятся отпечатки, выступает на этих снимках значительно сильнее. Это возрастание пропускаемости инфракрасного света с увеличением длины волны его наблюдалось также при спектроскопических исследованиях окрашенных тканей,[2] пряжи, обоев и т. д. Обратный случай, т. е. увеличение поглощения с возрастанием длины волны, до сих пор имел место только для красящего вещества крови, что будет рассматриваться ниже.

Своеобразные изменения поглощательной способности красок в инфракрасном свете могут иметь значение в производстве ценных бумаг. Представляется, например, возможным выполнять рисунок на бумажных деньгах частью в поглощающих инфракрасный свет, а частью в прозрачных

Ортохроматический снимок

Область длин волн 720—780 *мм*

Область длин волн 840—900 *мм*

Рис. 1. Краски:

1. Киноварь
2. Мумия
3. Ганзагельб
4. Ганзагельб + следы милориблау
5. Ганзагрюн + ганзагельб
6. Милориблау + желтый хром
7. Рефлексблау
8. Индантрейблау
9. Фаналь — Бремерблау В
10. Милориблау
11. Хлорамин — черная
12. Сажа

Отпечатки пигментных красок, снятые в видимом и инфракрасном свете.

для него красках, однако кажущихся обычному глазу совершенно одинаковыми. Тем же путем можно помещать на бумажных деньгах скрытые изображения, выявляющиеся только в инфракрасном свете. Далее, в образцы прозрачные для инфракрасного света можно впечатывать рисунки, одинаково окрашенные в белом свете, но сделанные при помощи красок, поглощающих инфракрасные лучи, или же печатать рисунок из поглощающего инфракрасный свет вещества, вместе с рисунком, равно окрашенным в видимом свете, но прозрачным для инфракрасного и т. д. Во всех этих случаях подделка становится чрезвычайно затруднительной, так как безукоризненность подлинного рисунка легко может быть установлена при помощи инфракрасного снимка.

Особенное значение при этом имеет то обстоятельство, что совсем незначительная, не ощутимая глазом примесь поглощающего инфракрасные лучи вещества к прозрачным для этого света краскам легко обнаруживается на инфракрасном снимке. В этом случае достаточно менее 1% примеси поглощающего вещества к веществу, одинаково окрашенному в видимом свете, но прозрачному для инфракрасным лучей, чтобы поглощение инфракрасного света полученной смесью заметно изменилось.

II. Новые возможности применения инфракрасной фотографии в медицине

Гакстгаузен [3] установил на снимках кровеносной системы, что воспроизведение ее на инфракрасных снимках получается гораздо полнее и де-

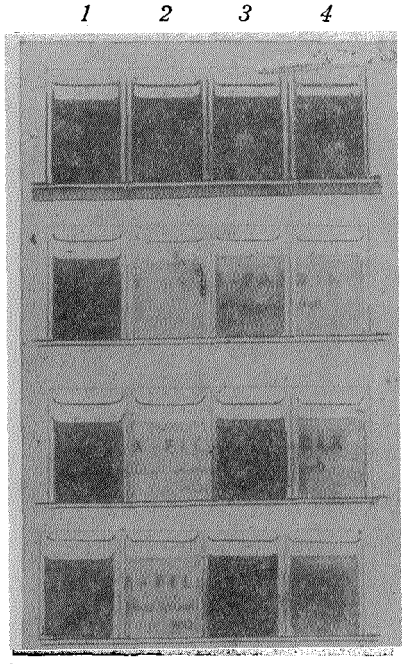


Рис. 2. Снимки крови (в кюветах, разбавление 1 : 3) при различном освещении. *1* — восстановленная кровь, *2* — кровь насыщенная CO, *3* — окисленная кровь, *4* — регенерированная кровь.

тальнее, чем на снимках, произведенных в видимом свете. Это объясняется тем, что для инфракрасного света кожа более прозрачна, чем для видимого. При этом способность крови поглощать инфракрасные лучи не играет никакой роли, так как и для видимого и для инфракрасного света она почти одинакова. Кретц в своем сообщении [4] утверждает, что вены, наполненные кровью, отравленной окисью углерода, на инфракрасных снимках выступают сильнее.

Для более точного исследования этих соотношений мы поставили в дополнение к указанным снимкам, выполненным in vivo, соответствующие опыты in vitro. [5] Постановку опыта можно видеть из рис. 2. Небольшие кюветы (толщина слоя жидкости 10 *мм*), поставленные на фоне белой бумаги с напечатанным черным текстом, освещались и фотографировались.*

* Об условиях съемки см. конец статьи.

Чем более прозрачна для употребляемого при снимке света была находящаяся в кювете жидкость, тем яснее выступали буквы подложенной бумаги. В кюветах находилась кровь свиньи, разбавленная водой в отношении 1 : 3 и различным образом обработанная. Растворы крови фильтровались и были вполне прозрачными.

Находящаяся в кювете *1* восстановленная кровь была получена прибавлением нескольких капель сернокислого аммония к 20 *см*³ разбавленной крови; кровь, насыщенная окисью углерода в кювете *2*, получалась получасовым пропусканием светильного газа, промытого в едком натре; окисленная кровь (кювета *3*) — пропусканием кислорода и, наконец, препарат, обозначенный как регенерированная кровь (кювета *4*, получался 30-минутным пропусканием воздуха через раствор крови, насыщенный окисью углерода.

На-глаз восстановленная кровь (рис. 2, кювета *1*) почти черна, в то время как образцы крови в следующих кюветах окрашены в вишнево-красный цвет и не отличаются друг от друга. Снимок, произведенный в видимом свете, не передает эти довольно незначительные различия яркости и все четыре кюветы получились на снимке одинаково темными. Напротив, образцы крови на инфракрасных снимках заметно отличаются друг от друга. Пропускаемость содержащегося в них красящего вещества крови (гемоглобина) для инфракрасных лучей, кроме того, зависит от их длины волны. CO-гемоглобин и оксигемоглобин, регенерированный из него с помощью воздуха, кажутся в инфракрасном свете трех различных волновых областей почти одинаково прозрачными. В случае регенерированного оксигемоглобина можно, пожалуй, установить небольшое повышение поглощательной способности с увеличением длины волны инфракрасного света. В этом отношении регенерированный оксигемоглобин подобен нормальному оксигемоглобину.

Восстановленный гемоглобин дает совершенно иную картину, чем оксигемоглобин. Для коротких длин волн инфракрасного света оксигемоглобин почти прозрачен, и, наоборот, восстановленный гемоглобин в тех же условиях поглощает почти полностью. В длинноволновом инфракрасном свете это соотношение будет обратным, а именно — восстановленный гемоглобин пропускает, в то время как оксигемоглобин поглощает сильнее, чем в свете коротких длин волн.

Мы распространили наши исследования на кровь человека и морских свинок, причем наши предыдущие опыты подтвердились. Тот же метод исследований, примененный в патологических случаях, оказался чрезвычайно чувствительным, чем он заметно превосходил остальные спектроскопические методы, например, метод получения абсорбционных кривых в видимой части спектра и проверки с их помощью присутствия восстанавливающих веществ в виде примесей к растворам крови. Беря каплю венозной крови, слегка отравленной окисью углерода, и фотографируя ее в инфракрасном свете прежним способом в сравнении с каплей нормальной крови, мы получали позитив, на котором отравленная кровь выглядела прозрачной, а нормальная — темной. Даже после того как пациент выдерживался в течение 15 мин. на свежем воздухе и спектроскопическим путем мы уже не находили в его крови окиси углерода, все же инфракрасный снимок давал еще положительный результат.

Особенно поразительным во всех этих опытах оказывается то, что кровь, подвергшаяся действию окиси углерода, даже в том случае, когда спектроскопически в ней уже нельзя найти следов окиси углерода, еще долгое время сохраняет характерную прозрачность для инфракрасных лучей, заметно отличаясь на инфракрасном снимке от нормальной крови. Дальнейшие опыты должны выяснить, происходит ли это своеобразное поведение растворов крови от упорно удерживающихся в ней следов окиси углерода, которые могут быть обнаружены только при помощи инфракрасной фотографии, или от каких-либо иных причин.

Далее с помощью инфракрасной фотографии нам удалось непосредственно наблюдать хорошо известное благоприятное действие инъекций метиленблау при отравлениях окисью углерода. Из двух случаев отравления

окисью углерода в одном была сделана инъекция метиленблау, в другом — нет. Пробы крови через 45 мин. после инъекции были сфотографированы в инфракрасных лучах, причем оказалось, что кровь, подвергнутая действию метиленблау, не дает никаких отклонений от нормы, в то время как кровь отравленная еще заметно пропускала инфракрасный свет. Однако до сих пор нам еще не удалось воспроизвести в кюветах эти in vivo проведенные опыты.

Для того чтобы сделать этот эффект более заметным, рекомендуется при легких отравлениях работать с неразбавленной кровью и употреблять для получения снимков небольшие капли крови, помещаемые на какомнибудь объекте. В наиболее тяжелых случаях можно вчетверо разбавлять кровь водой.

Для того чтобы установить более точно различные поглощательные способности растворов крови, полученных тем или иным путем, мы промерили поглощение в видимой области (рис. 3) в инфракрасном свете от 650 до 1000 mμ (рис. 4*). Объектами наблюдений служили те же самые

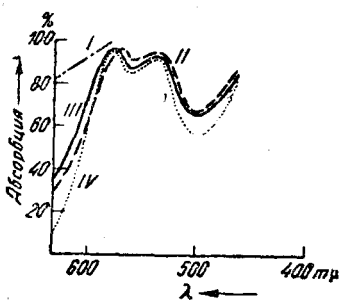


Рис. 3. Кривые абсорбции свиной крови в видимой области (разбавление 1 : 50). *I* — восстановленная кровь, *II* — кровь насыщенная CO, *III* — окисленная кровь, *IV* — регенерированная кровь.

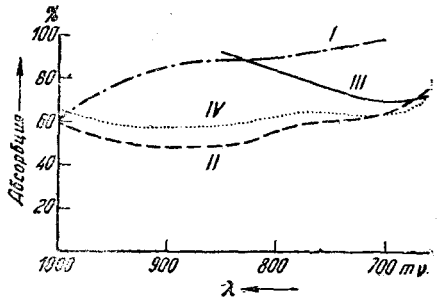


Рис. 4. Кривые абсорбции свиной крови в инфракрасной области (разбавление 1 : 2). *I* — восстановленная кровь, *II* — кровь насыщенная CO, *III* — окисленная кровь, *IV* — регенерированная кровь.

образцы крови, как и на рис. 2, однако здесь пришлось работать с разными концентрациями растворов крови для различных спектральных областей. Кривые получались спектрографическим методом Для снимков употреблялись пластинки „Агфа-суперпан" для видимой области и инфракрасные пластинки „Агфа 950 рапид" в комбинации со светофильтром № 42 — для инфракрасной области. Для спектрограммы в видимом свете растворы крови разбавлялись водой в 50 раз. При таком разбавлении все пробы крови в инфракрасном свете почти в равной мере оказываются прозрачными. Для снимка инфракрасной спектрограммы оказалось наиболее удобным разбавлением проб крови в отношении 1 : 2. На рис. 3 можно видеть хорошо известное [6] смещение максимума поглощения гемоглобина с 579 до 570 mμ для крови, отравленной окисью углерода. На рис. 4 можно заметить характерное увеличение абсорбции оксигемоглобина, что также наблюдается и для CO-гемоглобина в области 900—1000 mμ, но уже в значительно меньшей степени.

---

* Измерения производились М. Бильтцем.

III. Применение инфракрасной фотографии в фитопатологии

Зеленое красящее вещество листа — хлорофилл — прозрачно для красного света, начиная от 680 mμ. Принимая во внимание химическую близость хлорофилла к гемоглобину, можно сказать, что кривая адсорбции хлорофилла в инфракрасном свете соответствует скорее CO-гемоглобину, чем оксигемоглобину нормальной крови. Вследствие этих оптических свойств хлорофилла позитивное изображение зеленого листа, снятого в инфракрасных лучах, должно получиться почти белым, так как бесцветное вещество клетчатки уже не содержит хлорофилла. Особый интерес имеет то обстоятельство, что прозрачность хлорофилла для инфракрасного света сохраняется еще спустя 30 000 000 лет, что видно из рис. 5, на котором представлены снимки ископаемого листа, найденного в Гейзельтале. [7]

Эти специфические свойства хлорофилла дают возможность с пользой применить инфракрасную фотографию для изучения и диагностики тех болезней растений, которые разрушают хлорофилл или имеют это следствием, так как только клеточное содержимое здорового листа прозрачно для инфракрасного света. [8] Разрушение хлорофилла паразитами или каким-либо иным образом должно также обнаруживаться на инфракрасном снимке, что действительно и можно видеть на снимке засыхающего листа (см рис. 6). В тех местах, где лист затронут, уже не имеется жизнеспособных клеток и, следовательно, хлорофилл в этих местах разрушен, вследствие чего на инфракрасном снимке они должны отличаться от нетронутых мест зеленого листа. Ортохроматический снимок этого не дает.

IV. Применение инфракрасной фотографии в микроскопии

При изготовлении микропрепаратов, особенно таких, как препараты насекомых и других небольших животных, зачастую приходится иметь дело, с пигментированными оболочками, которые необходимо обесцветить при помощи соответствующих химических средств для того, чтобы сделать их более или менее прозрачными. Нельзя также не упомянуть то обстоятельство, что способы такой обработки не всегда безвредны не только в отношении случайных механических повреждений препарата, что особенно неприятно, когда препарат представляет собой редкость, но также и в трудности регулирования процесса отбеливания. Эти препятствия вполне устраняются применением инфракрасной фотографии. [9] На рис. 7* представлена голова мучного червя в обычном и в обесцвеченном состоянии, сфотографированная в видимом и инфракрасном свете. Можно заметить, что инфракрасный снимок необесцвеченного препарата дает возможность рассмотреть по меньшей мере все те же детали, которые имеются и на обесцвеченном препарате.

Помимо этого подбором соответствующих пластинок и фильтров можно добиться выделения отдельных частей наблюдаемого объекта.

Некоторые затруднения доставляет наводка микроскопа в инфракрасном свете. Науманн [10] дает следующий практический совет: микроскоп сначала устанавливается на резкость в желто-зеленом свете (например, при помощи фильтра Агфа № 70) и отмечается положение микрометрического винта, затем добиваются резкости наводки в красном свете (например, с красным светофильтром Агфа № 42) и снова отмечают положение винта. Вычитая второй отсчет из первого и поворачивая винт от его положения в красном свете на удвоенную разность этих отсчетов, можно добиться резкости в инфракрасном свете примерно для 820 mμ. Относительно снимков при больших длинах волн можно прибавить следующее: фотографии рис. 7 были получены с микроскопом Leitz — Panphot и „3,8 × окуляр 10 × " на

---

* Препарат любезно предоставлен нам проф. Фришем (Мюнхен), за что мы и выражаем ему свою благодарность.

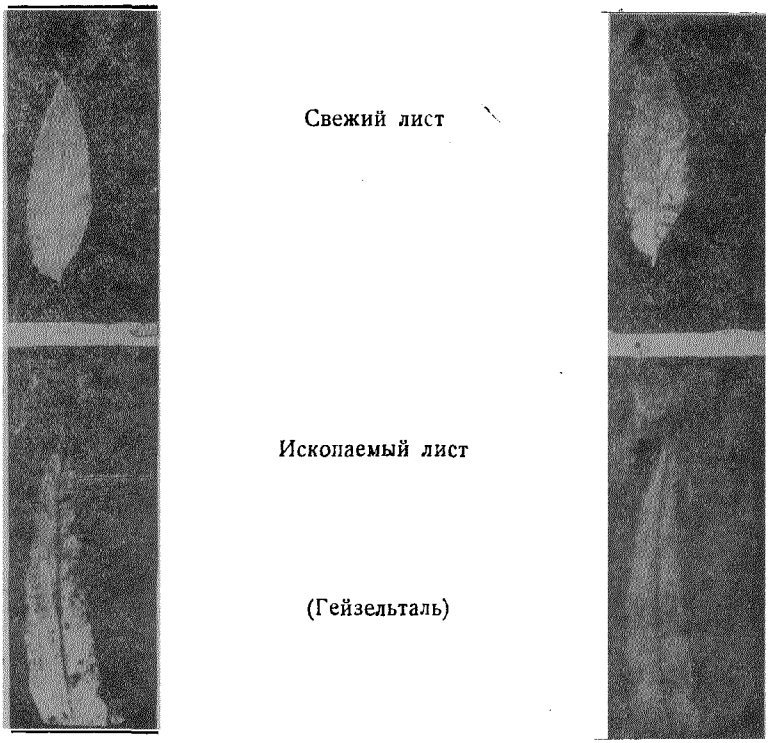
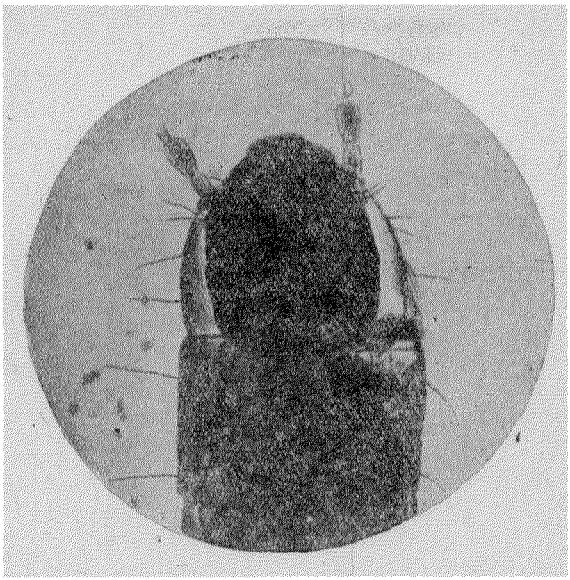


Рис. 5. Свежий и ископаемый лист, снятые в видимом и инфракрасном свете. Слева: ортохроматический снимок, справа: инфракрасный снимок.

Рис. 6. Снимок листа, поврежденного засухой. Слева: ортохроматический снимок, справа: инфракрасный снимок.



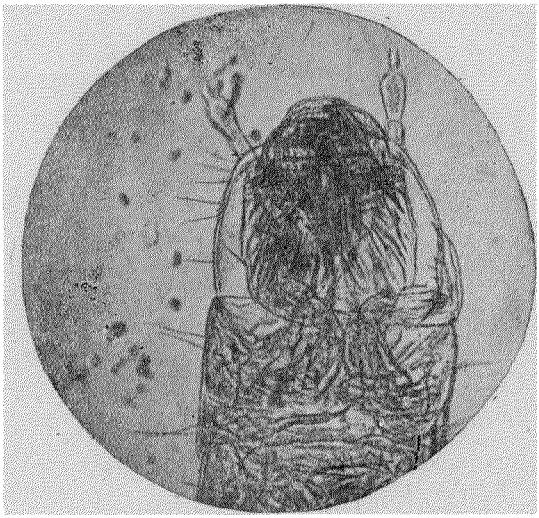


Рис. 7а. Микрофотограммы головы мучного червя (масштаб 63 : 1) Необесцвеченный препарат. Слева ортохроматический снимок, справа инфракрасный снимок.

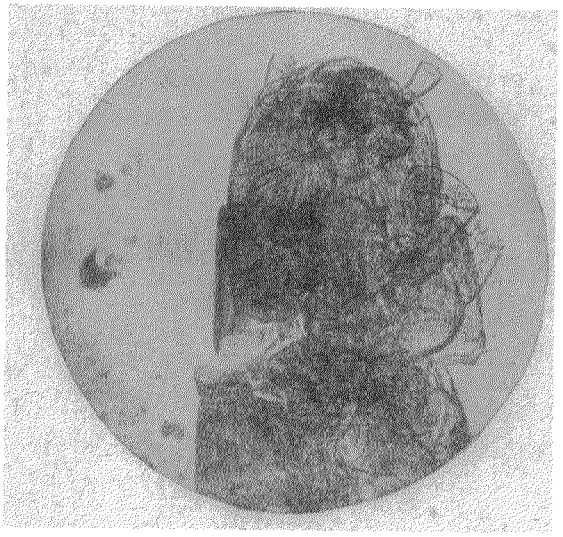


Рис. 7b. Микрофотограммы головы мучного червя (масштаб 63 : 1). Обесцвеченный препарат. Слева ортохроматический снимок, справа инфракрасный снимок.

инфракрасных пластинках „Агфа 850 рапид" с черным светофильтром Агфа № 87 (пропускающем область 850—900 mμ). После фокусировки в красном свете винт надо было переместить на 130 μ. Чтобы получить резкий снимок в инфракрасном свете, приходилось перемещать винт на 130 μ от его положения при резкости в красном. Экспозиция в этом случае при употреблении этого микроскопа, нитролампы и открытой диафрагмы составляла 1 сек.

В заключение приведем еще дополнительные фотографические данные для инфракрасных снимков, иллюстрирующих настоящую статью. Второй ряд снимков (рис. 1 и 2) был получен на пластинках для инфракрасного света „Агфа 750 рапид" с черным светофильтром Агфа № 83. Экспозиция с диафрагмой 11, при освещении тремя нитрофотолампами по 500 w каждая, на расстоянии 1 *м* составляла 1 сек. Снимки третьего ряда (рис. 1 и 2), а также инфракрасные снимки (рис. 5 и 6) произведены на пластинках „Агфа 850 рапид" со светофильтром Агфа № 85. Время освещения было то же при диафрагме 5,6 и для тех же условий освещения. Снимки четвертого ряда (рис. 2) были сделаны на пластинках „Агфа 950 рапид" со светофильтром Агфа № 889. Экспозиция при тех же условиях освещения и при диафрагме 4,5 составляла 13 сек. В качестве объектива был взят „Агфа-Солинар" $f=1:4{,}5$ в Агфа-изоляр-камере. Условия снимков (рис. 7) уже приведены. Проявление производилось в родинале 1:20 в течение 5 мин. при освещении лампой тлеющего разряда через защитный светофильтр Агфа № 114.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Fröhlich, Dtsch. Drucker **40**, 291, 1934.
2. A. Fröhlich, Illustrierte Textilztg. **1933**, № 41/42; Dtsch. opt. Wschr. **19**, 477, 1933; Dtsch. Wirkerztg. **1934**, 39, 11.
3. Haxthausen, Dermat. Wschr. **35**, 1289, 1933; R. T. Payne, Lancet 1934, H. Febr. 3; Brit. J. Photography **81**, 69, 1934.
4. Krötz, Vortrag am 9 Januar 1934 in der Med. Ges. in Hamburg.
5. A. Fröhlich u. G. Rodenacker, Münch. med. Wschr. **82**, 146, 1935.
6. L. Lewin, A. Miethe u. E. Stenger, Pflügers Arch. **118**, 80, 1907.
7. A. Fröhlich u. F. Luft, Umschau **38**, 534, 1934.
8. F. C. Bawden, Nature **1933** (29/VII); Brit. J. Photography **80**, 2822, 449, 1933.
9. G. Reinert, Zeiss-Nachr. **1933**, H. 4, 13; P. Kraft, Ber. über den 8 Internationalen Kongress für Photographie in Dresden 1931, S. 341, Lpz. 1932; F. Pax, Zool. Anz. **106**, 15, 1934.
10. H. Naumann, Z. Instrumentenkunde **54**, 276, 1934; Blätter für Untersuchungs- u. Forschungsinstrumente, 38, 1933.