
Možnosti technické fotografie pořízené upraveným digitálním fotoaparátem při průzkumu uměleckých děl. Vymezení pojmů a výběr vhodného vybavení

Petra Lesniaková, David Svoboda, Jan Vojtěchovský

Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování

KLÍČOVÁ SLOVA

průzkum uměleckých děl – technická fotografie – vědecká fotografie – upravený digitální fotoaparát – infračervená fotografie – ultrafialová fotografie – UV fluorescenční fotografie

KEY WORDS

survey of works of art – technical photography – scientific photography – modified digital camera – infrared photography – ultraviolet photography – UV fluorescence photography

TECHNICAL PHOTOGRAPHY FOR EXAMINATION OF WORKS OF ART.

DEFINITION OF TERMS AND CHOICE OF SUITABLE EQUIPMENT

Imaging techniques provide non-destructive and non-contact survey and documentation of cultural heritage. Technical photography in UV-VIS-IR range captured by “full-spectrum” modified (converted) digital camera presents affordable imaging technique, which could become common in the restoration practice. This study presents current potential of technical photography, equipment and optimal procedures of image capturing and post-processing. The article focuses on “full-spectrum” modification of the digital camera in theory and practice and the selection of the suitable photographic equipment with appropriate optical filters. The range of imaging techniques includes visible photography (VIS), ultraviolet photography (UVR), infrared photography (IRR), ultraviolet-induced fluorescence/luminescence photography (UVF/UVL) and possibly visible-induced visible luminescence photography (VIVL).

1 | Lindsay W. MacDonald – Tatiana Vitorino – Marcello Picollo et al., Assessment of multispectral and hyperspectral imaging systems for digitisation of a Russian icon, *Heritage Science*, 2017, č. 5:41, s. 1–16.

2 | Haida Liang, Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation, *Applied Physics A*, 2012, č. 106, s. 309–323.

3 | Antonino Cosentino, Practical notes on ultraviolet technical photography for art examination, *Conservar Património*, 2015, č. 21, s. 53–62. Ahmed Abdrabou – Medhat Abdalla – Islam A. Shaheen et al., Investigation of an ancient egyptian polychrome wooden statuette by imaging and spectroscopy, *International Journal of Conservation Science*, 2018, č. 9, s. 39–54.

4 | Joanne Dyer – Giovanni Verri – John Cupitt, *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual*, London 2013, zvl. s. 44. Viz MacDonald – Vitorino – Picollo et al. (pozn. 1). Viz Liang (pozn. 2).

5 | Z anglické terminologie: UV – ultraviolet/ultrafialový, VIS – visible/viditelný, IR – infrared/infračervený.

Úvod

Zobrazovací metody nacházejí nenahraditelné uplatnění při neinvazivních průzkumech, diagnostice a dokumentaci předmětů kulturního dědictví, především malířských, polychromovaných nebo povrchově upravených artefaktů a děl písemné kultury. V současnosti se již běžně využívají nejen širokospektrální a multispektrální, ale také hyperspektrální zobrazovací techniky.^[1] Hranice mezi uvedenými oblastmi se v odborné literatuře mnohdy překrývají, jejich definice není ustálená a bývá často odvislá od zvyklostí jednotlivých autorů, data vydání publikace nebo například oboru využití.^[2] Pro fotografické techniky širokospektrálního zobrazování, které jsou předmětem předkládaného textu, se používají pojmy technická či vědecká fotografie.^[3] Zároveň bývají v mnohých případech označovány a kvůli nevyjasněné terminologii možná někdy nesprávně zaměňovány za multispektrální zobrazování.^[4]

Práce se zaměřuje na vybrané metody technické fotografie, případně v teoretické rovině také multispektrálního zobrazování v UV-VIS-IR^[5] oblastech spektra záření, jež je v současnosti možné zajistit i poměrně finančně dostupnou digitální fotografickou technikou, respektive speciálně upraveným digitálním fotoaparátem s vhodnými filtry. V posledních desetiletích došlo zejména v zahraničí ke značnému rozšíření a inovaci metod širokospektrálního a multispektrálního zobrazování v restaurátorsko-konzervátorské praxi, nejen kvůli dobré finanční dostupnosti kvalitní digitální techniky a nepřeberné nabídce příslušenství, ale také díky možnosti snadného získání, zpracování a archivace velkého množství digitálních dat. Na druhou stranu může rozsáhlá a rychle se měnící nabídka zároveň značně znesnadnit základní orientaci v řešené problematice a jejím vývoji. Kvalifikované využití zobrazovacích technik, výběr vhodného zařízení, pracovního postupu a zpracování získaných dat proto vyžadují mnohem vyšší nároky na základní porozumění všem souvisejícím aspektům.

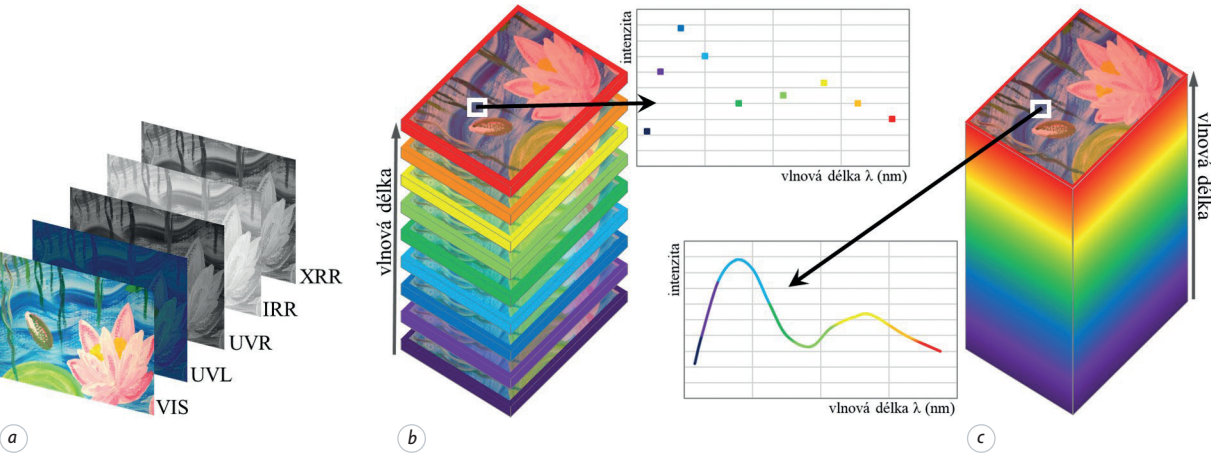
Cílem práce je přiblížit současné možnosti technické fotografie v dostupné podobě a nastínit postupy získání a následného zpracování kvalitních snímků s relativně vysokou vypovídací hodnotou. Text vychází z rešerše publikovaných výsledků zahraniční praxe a specializovaných internetových stránek. Základním rozsahem technik praktické části práce byla fotografie v bílém (plně spektrálním viditelném) světle, infračervená fotografie (IRR) v několika oblastech IR záření, ultrafialová fotografie (UVR) a ultrafialová fluorescenční/luminiscenční fotografie (UVF/UVL). Předkládaný text se zaměřuje na úpravu fotoaparátu, výběr fotoaparátu, objektivů a vhodných fotografických filtrů.

Vymezení pojmů, využití zobrazovacích technik

Pomocí zobrazovacích metod se získávají obrazové záznamy daného předmětu v různých oblastech spektra elektromagnetického záření, které jsou výsledkem interakce předmětu se zdrojovým zářením. Při širokospektrálním zobrazování (Obr. 1a) se využívá či zaznamenává záření z relativně širokých a na sobě nezávislých částí spektra elektromagnetického záření (rentgenového, ultrafialového, viditelného atp.).

Multispektrální a hyperspektrální zobrazování (Obr. 1b, 1c) potom pracují s větším množstvím snímků pořízených v užších, za sebou následujících pásmech záření. Tyto snímky je možné použít k získání spektrální informace v konkrétním místě, respektive bodě díla. Výsledkem je tedy trojrozměrná informace, ze které dva rozměry představují obraz a třetí je spektroskopickou informací umožňující materiálovou analýzu. Tato trojrozměrná informace se běžně označuje jako „data-cube“ nebo také „image-cube“.^[6]

Rozdíl mezi multispektrálním a hyperspektrálním zobrazováním je možné zjednodušeně vymezit tak, že hyperspektrální zobrazování pracuje s řádově vyšším množstvím navazujících spektrálních pásem s menší pracovní šířkou než multispektrální zobrazování. U multispektrálního zobrazování se v odborné literatuře uvádí počet snímáných obrazů v počtu jednotek, maximálně okolo dvaceti. Přibližná spektrální šířka pásem se pohybuje mezi 10 a 50 nm. Hyperspektrální zobrazování potom pracuje se stovkami snímků a spektrální šířkou pásem v jednotkách nm, maximálně asi s 10 nm. Může tak poskytnout velmi precizní spektroskopickou (analytickou) informaci v každém pixelu. V současnosti se již používá pojem ultraspektrální pro systémy, které sbírají tisíce obrazů a pracují s šířkou pásma jen asi 0,1 nm.^[7]



Obr. 1 Ilustrační znázornění rozdílů mezi zobrazovacími technikami: a) širokospektrální zobrazování – viditelné světlo (VIS), ultrafialová luminiscenční fotografie (UVL), ultrafialová reflektografie/fotografie (UVR), infračervená reflektografie/fotografie (IRR), rentgenografie (XRR); b) datový set deseti multispektrálních obrazů a získaná data z jednoho pixelu vynesena do grafu; c) hyperspektrální (případně ultraspektrální) zobrazování, trojrozměrný datový set s vygenerovanou spektrální křivkou pro daný pixel. Autorka schémat: Petra Lesniaková

Zobrazovací techniky byly do péče o památky převzaty z jiných oborů a jejich využití se neustále významně rozšiřuje. Používají se v medicíně, biologii, chemii, potravinářství, zemědělství, vojenství, kriminalistice, letecké fotogrametrii či astrofyzice. Jejich výhodami jsou neinvazivnost a bezkontaktnost, ale také možnost snadného a rychlého získání až nezměrné škály obrazových i analytických informací.

V oblasti péče o kulturní dědictví nalézají zobrazovací techniky nenahraditelné uplatnění, přičemž příkladů běžného využití technické fotografie bychom našli nespočetné množství. Za všechny lze jmenovat alespoň ty nejdůležitější, mezi které patří lokalizace a rozlišení oblastí s různým

6 | Uvedenou klasifikaci bude respektovat tento text.

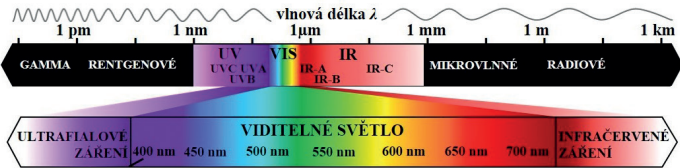
7 | Viz MacDonald – Vitorino – Picollo et al. (pozn. 1), s. 3. Viz Liang (pozn. 2). Costanza Cucci – John K. Delaney – Marcello Picollo et al., Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: old master paintings and illuminated manuscripts, *Accounts of Chemical Research*, 2016, č. 49, s. 2070–2079.

8 | V literatuře nejsou oblasti elektromagnetického záření vždy jednotné, proto jsou v tabulce uvedeny základní hodnoty podle ISO 21348, 2007. *International standard: Space environment (natural and artificial). Process for determining solar irradiances*, Technical Committee ISO/TC 20/SC 14 Space systems and operations. Další dělení nebo hodnoty v závorkách vycházejí z Christian Fischer – Ioanna Kakoulli, Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications, *Reviews in Conservation*, 2006, č. 7, s. 3–16. Dmitry Gavrilov – Roman Gr. Maev – Darryl P. Almond, A review of imaging methods in analysis of works of art: Thermographic imaging method in art analysis, *Canadian Journal of Physics*, 2014, č. 92, s. 341–364, zvl. s. 344, dostupné na: <https://cdnsicepub.com/doi/10.1139/cjp-2013-0128>, vyhledáno 14. 4. 2021. Uvedené hodnoty nepostihují veškerá dělení uvedená v odborné literatuře. Například blízké infračervené záření se zkratkou NIR podle některých publikací zasahuje až do 2 500 nm. Alessia Daveri et al., New perspectives in the non-invasive, in situ identification of painting materials: The advanced MWIR hyperspectral imaging, *Trends in Analytical Chemistry*, 2018, č. 98, s. 143–148, zvl. s. 143.

materiálovým složením, včetně druhotných zásahů a poškozených míst, rozpoznání technik maleb, zviditelnění podkreseb a dalších přípravných či jiných skrytých vrstev, ale také upřesnění výskytu laků, lazur a defektů nebo identifikaci a mapování pigmentů. Multispektrálním a zejména hyperspektrálním zobrazováním se potom přínos zobrazovacích technik rozšiřuje o přesnou identifikaci a mapování různých materiálů včetně pigmentů, barevnou digitální rekonstrukci předlohy (malby) nebo dokonce realizaci virtuálního restaurování, například čištění a snímání laků, či simulaci a monitorování stárnutí.

Základní UV-VIS-IR širokospektrální techniky

Kvůli dané spektrální citlivosti křemíkových polovodičových senzorů lze upravený digitální fotoaparát využít kromě viditelného světla (VIS) také v ultrafialové (UV/UVA) a infračervené (IR/NIR) části elektromagnetického záření přilehlé k viditelnému světlu (*Obr. 2*). Pouze tyto spektrální oblasti dokáže senzor fotoaparátu zaznamenat. Spektrální rozsahy zájmových oblastí záření nejsou v odborné literatuře jednotné a většinou se pohybují v rozmezích uvedených v tabulce (*Tab. 1*). Zásadním způsobem ovlivňují výběr zářičů a fotografických filtrů, kterých existuje nepřeberné množství. Jejich nesčetnými kombinacemi lze potom upravenými digitálními fotoaparáty získat nejen soubory širokospektrálních, ale i multispektrálních snímků. Můžeme obecně říci, že k hyperspektrálnímu zobrazování se využívají komplikovanější technologie a vybavení.



Obr. 2 Spektrum elektromagnetického záření se zvýrazněnou oblastí zájmu UVA-VIS-NIR pro technickou fotografii, kterou je možné získat upraveným digitálním fotoaparátem. Autorka schématu: Petra Lesniaková

Tab. 1 Vybrané oblasti a podoblasti elektromagnetického záření, spektrální rozsahy, zkratky.^[8]

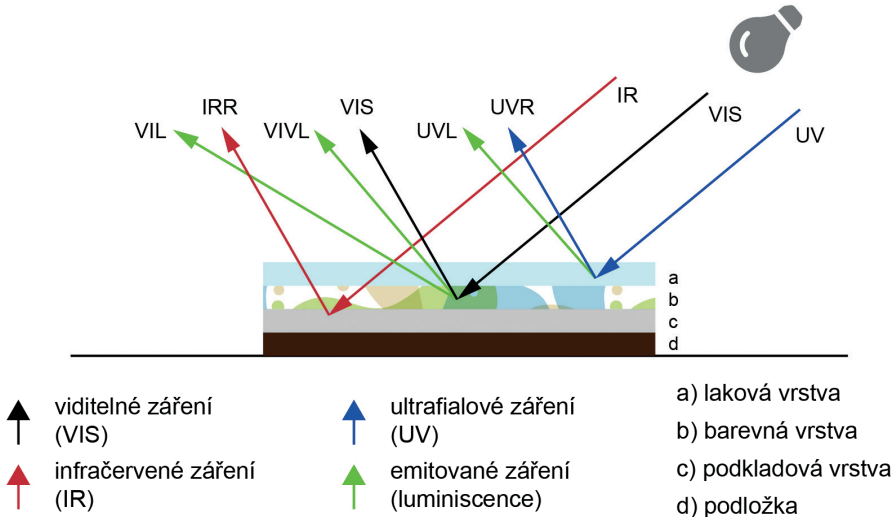
Oblast záření, vybrané podoblasti	Zkratka	Rozsah vlnových délek [nm]
Ultrafialová: krátkovlnná / středněvlnná / dlouhovlnná	UV: UVC, UVB, UVA	10–400: 100–280 / 280–315 / 315–400
Viditelná: fialová / modrá / zelená / žlutá / oranžová / červená	VIS	380 (360, 400)–760 (700): 360 (400)–450 (420) / 450 (420)–500 (460) / 500 (460)–570 (560) / 570 (560)–591 (610) / 591 (610)–610 (660) / 610 (660)–760
Infračervená: blízká / střední / daleká blízká / krátkovlnná / středněvlnná	IR: IR-A, IR-B, IR-C NIR, SWIR, MWIR	760 (700)–1000000: 760 (700)–1400 (1000) / 1400–3000 / 3000–1000000 700–1000 (1100) / 1000 (1100)–2500 / 2500–15000

Podle principu je možné zobrazovací metody dělit na reflexní, luminiscenční^[9] a transmisní.^[10] Reflexní techniky zaznamenávají záření odražené od předmětu. Záření dopadající na předmět tedy musí zahrnovat alespoň takový spektrální rozsah, který je zároveň snímán. Mezi základní reflexní širokospektrální techniky v UV-VIS-IR oblastech spektra patří záznam a zobrazování bílého světla (visible reflected, VIS), infračervená fotografie/reflektografie (infrared photography/reflectography, IRR) a ultrafialová fotografie/reflektografie (ultraviolet photography/reflectography, UVR) (*Tab. 2*).

V případě luminiscenčních metod se snímá emisní záření buzené (indukované, generované) energeticky silnějším zářením. Spektrum zaznamenaného záření je tedy odlišné od záření dopadajícího na předmět, vyznačuje se delšími vlnovými délkami. Základní luminiscenční metodou ve spektrální oblasti zájmu je ultrafialová luminiscenční/fluorescenční fotografie (ultraviolet-induced luminescence/fluorescence, UVL/UVF). Dále sem patří méně časté techniky infračervené luminiscence indukované viditelným světlem (visible-induced infrared luminescence, VIL) a viditelné luminiscence generované viditelným světlem (visible-induced visible luminescence, VIVL).

Tab. 2 Základní reflexní a luminiscenční širokospektrální techniky, které lze získat upraveným digitálním fotoaparátem s přibližnými rozmezími vlnových délek zdrojového a detekovaného záření.^[12]

Typ techniky, zkratka	Zdrojové záření [nm]	Detekované záření [nm]
Ultrafialová fotografie (UVR)	315–400	315–400
Viditelná reflexe / fotografie v bílém viditelném světle (VIS)	400–700	400–700
Infračervená fotografie (IRR)	700–1100	700–1100
Viditelná fluorescence / luminiscence buzená UV zářením (UVF/UVL)	315–400	400–700
Infračervená luminiscence generovaná viditelným světlem (VIL)	400–700	700–1100
Viditelná luminiscence generovaná modrým světlem (VIVL)	400–500 (520)	500 (520)–700



Obr. 3 Obecná výstavba malby či povrchových úprav a přehled základních reflexních a luminiscenčních technik širokospektrální fotografie. Na obrázku je ilustrován rozdíl v běžné hloubce průniku UV-VIS-NIR záření, která se zaznamenávají upraveným digitálním fotoaparátem: ultrafialové (UV) záření většinou neprostupuje, viditelné (VIS) světlo zpravidla prostupuje vrchními průhlednými/poloprůhlednými vrstvami, infračervené (IR) záření prostupuje hlouběji některými barevnými vrstvami.^[13] Autor schématu: David Svoboda

14 | Štěpánka Chlumská – Václava Antušková – Helena Dáňová et al., *Materiálový průzkum a dokumentace středověkých děl. Deskové malířství a sochařství 1300–1530. Památkový postup*, Národní Galerie v Praze, 2017. E. Keats Webb, Reflected infrared and 3D imaging for object documentation, *Journal of the American Institute for Conservation*, 2017, s. 1–14.

Transmisní techniky pracují se zářením procházejícím skrze předmět. Využívají se u předmětů, kterými může záření procházet v různé míře. V UV-VIS-IR oblasti záření se jedná o tenčí, perforovaná nebo polo-průhledná, průhledná díla, například malby na textilních či papírových podložkách. Studie se na tyto techniky nezaměřuje, nicméně mnohé principy vztahující se k reflexi i technické vybavení lze uplatnit také v této oblasti. Při zobrazování a průzkumu předmětů kulturního dědictví, zejména vrstevnatých děl, je dále nutné si uvědomit, že každá ze zájmových oblastí záření se obecně vyznačuje rozdílnou schopností průniku, která je u maleb ilustrována na *Obr. 3*.

Infračervená reflexe (fotografie/reflektografie, IRR)

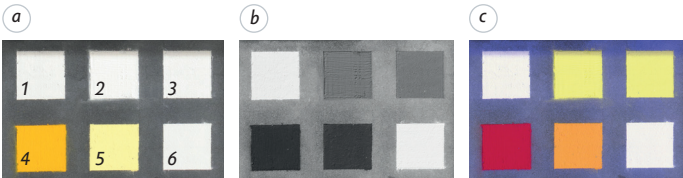
V tomto případě je předmět ozařován IR zářením, jehož různé spektrální části jsou zároveň snímány. IR záření má v porovnání s viditelným světlem a UV zářením největší schopnost průniku, může do určité míry prostupovat vrstvami. IR reflexe se využívá zejména k odhalení podkresů a jiných skrytých vrstev, autorských změn (*pentimenti*) či starších maleb. V optimálních případech lze zjistit nejen rozvržení podkresby, ale také její techniku, případně materiál. Dále je možné odlišit různé materiály, a tak například odhalit tmely, retuše, přemalby (*Obr. 4*), záznamové prostředky, degradované části či mapovat, případně identifikovat pigmenty. Kromě upravených fotoaparátů se používají především IR kamery, které mohou pracovat v rozšířených oblastech IR spektra, nebo přístrojové kombinace rozšiřující průzkum o další techniky a oblasti záření.^[14]

Obr. 4 Olejomalba Zvěstování Panně Marii ze soukromé sbírky – výřez: a) snímek v rozptýleném bílém světle (VIS); b) infračervená fotografie (IRR). Na infračervené fotografii lze lépe lokalizovat tmely a retuše malby, které se vyznačují výrazně tmavším odstínem. Autor: Jan Vojtěchovský



Ultrafialová reflexe (fotografie/reflektografie, UVR)

Při této metodě se snímá odražené UV záření, které má nízkou penetrační schopnost. Proto lze při jeho využití získat informace zejména o povrchu, podobně jako při UV luminiscenční fotografii. Obě metody pracují se stejným typem zdrojového záření, kterým bývá UVA záření.^[15] UV reflexní techniky napomáhají při charakterizaci povrchu díla, rozložení odlišných materiálů, například laků a vrstev z druhotných zásahů či lokalizaci poškození a dalších jevů, které nelze zaznamenat okem. Metoda může být dobrým nástrojem rozlišení, případně identifikace některých pigmentů (*Obr. 5*). Nejznámějším příkladem je odlišení titanové a zinkové běloby, které se projevují sníženou intenzitou odraženého UV záření oproti jiným bílým pigmentům (např. olovnatá běloba, litopon).^[16]



Obr. 5 Příklad využití ultrafialové reflexe (UVR) a ultrafialové reflexní fotografie ve falešných barvách (UVRFC) k orientačnímu rozlišení vybraných pigmentů stejné barevnosti: a) snímek v bílém světle (VIS); b) ultrafialová fotografie (UVR); c) ultrafialová fotografie ve falešných barvách (UVRFC). Na zkušebním panelu jsou použity následující pigmenty: 1) olovnatá běloba, 2) titanová běloba, 3) zinková běloba, 4) kadmiová žluť, 5) olovnato-cínčitá žluť, 6) barytová běloba. Fotografie byly kalibrovány pomocí ColorChecker Passport Photo 2 (X-Rite).^[17] Autor: David Svoboda

Ultrafialová fluorescence/luminiscence (UVF/UVL)

Jedná se o snadno dostupnou a široce využívanou techniku. Ve zdrojovém UV záření se materiály tvořící zkoumané dílo projevují rozdílnou intenzitou, barvou i odstínem vzniklé viditelné fluorescence. Intenzivní UV fluorescenci se vyznačují zejména organické látky, což se uplatňuje při lokalizaci laků (*Obr. 6*) a jiných organických vrstev. Metodou lze odhalit druhotné zásahy, biologické napadení, přítomnost solí, projevy degradace a poškození. Slouží k monitoringu a kontrole restaurátorskokonzervátorských úkonů. V ojedinělých případech, na základě zkušenosti i pravděpodobnosti, lze jisté materiály díky typické UV fluorescenci identifikovat či orientačně určit. Příkladem je zinková běloba s intenzivní zeleno-žlutou UV fluorescencí.^[18]



15 | UV záření je škodlivé lidskému zdraví, může vést například k poškození zraku. Proto se k zobrazování využívá UVA záření, které je nejméně škodlivé. Při průzkumu je nutné vždy používat ochranné brýle, případně další ochranné pomůcky.

16 | Antonino Cosentino, Identification of pigments by multispectral imaging: a flowchart method, *Heritage Science*, 2014, č. 2:8, s. 1–12. Franz Mairinger, Ultraviolet, Infrared and X-ray Imaging, in: Koen Janssens – Rene Van Grieken edd., *Non-destructive Micro Analysis of Cultural Heritage Materials*, Amsterdam, 2004. Viz Cosentino (pozn. 3).

17 | David Svoboda, *Restaurování skleněné mozaiky s motivem racka z dolní stanice lanovky na Pastýřskou stěnu v Děčíně. Restaurování kamenné mozaiky Ptačí rodina v ulici Lidická v Litomyšli, Technická fotografie v UV, IR záření a falešných barvách* (diplomová práce), Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, Litomyšl 2020.

18 | Ivana Studeník Milionová – Petra Lesniaková – Jan Vojtěchovský, Výzkum UV fluorescence vodorozpuštěných anorganických solí na povrchu historických omítek, *e-Monumentica*, 2017, č. 1, 2017, s. 33–48. Jill Dunkerton – Raymond White, The discovery and identification of an original varnish on a panel of Carlo Crivelli, *National Gallery Technical Bulletin*, 2000, č. 21, s. 70–76. Martha Simpson Grant, The use of ultraviolet induced visible-fluorescence in the examination of museum objects, Part I, *Conserve O Gram*, 2000, č. 1/9, s. 1–3. Viz Cosentino (pozn. 3).

Obr. 6 Příklad využití UV fluorescenční fotografie, nástěnná malba nad východní částí hudebního kůru v kostele sv. Petra a Pavla v Rajhradu: a) snímek v rozptýleném bílém světle (VIS); b) ultrafialová fluorescenční fotografie (UVF). Na UV fluorescenční fotografii (8b) jsou zvýrazněné partie, ve kterých byla použita zinková běloba. Vyznačují se zeleno-žlutou UV fluorescencí charakteristickou právě pro tento pigment. Autoři: David Svoboda, Jan Vojtěchovský

19 | Alessia Daveri – Manuela Vagnini – Francesca Nucera et al., Visible-induced luminescence imaging: A user-friendly method based on a system of interchangeable and tunable LED light sources, *Microchemical Journal*, 2016, č. 125, s. 130–141. Joanne Dyer – Diego Tamburini – Elisabeth R. O’Connell et al., A multispectral imaging approach integrated into the study of Late Antique textiles from Egypt, *PLoS ONE*, 2018, č. 13 (10):e0204699, s. 1–33.

20 | Viz Dyer – Verri – Cupitt (pozn. 4), s. 5. Charlotte Martin de Fonjaudran, Optical and theoretical investigation of Indian yellow (euxanthic acid and euxanthone), *Dyes and Pigments*, 2017, č. 144, s. 234–241.

21 | Joanne Dyer. Ladies aglow: finding the colour in 2,000-year-old figurines. *British Museum Blog*, September 2017, <https://blog.britishmuseum.org/ladies-aglow-finding-the-colour-in-2000-year-old-figurines/>, vyhledáno 28. 3. 2021, obrázek byl publikován pod licencí Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Viditelná luminiscence indukovaná viditelným světlem (VIVL)

K vybuzení viditelné luminiscence se používají různě ohraničené (barevné) oblasti světla. Zaznamenává se luminiscence ve zbývající části viditelného spektra. Nejčastěji se zkoumá viditelná luminiscence buzená modrým, případně zeleným světlem. Touto technikou lze orientačně určit a lokalizovat některé organické pigmenty/barviva, zpravidla žluté a červené lakové pigmenty (Obr. 7 uprostřed) nebo zvýraznit jisté jevy.^[19]

Infračervená luminiscence indukovaná viditelným světlem (VIL)

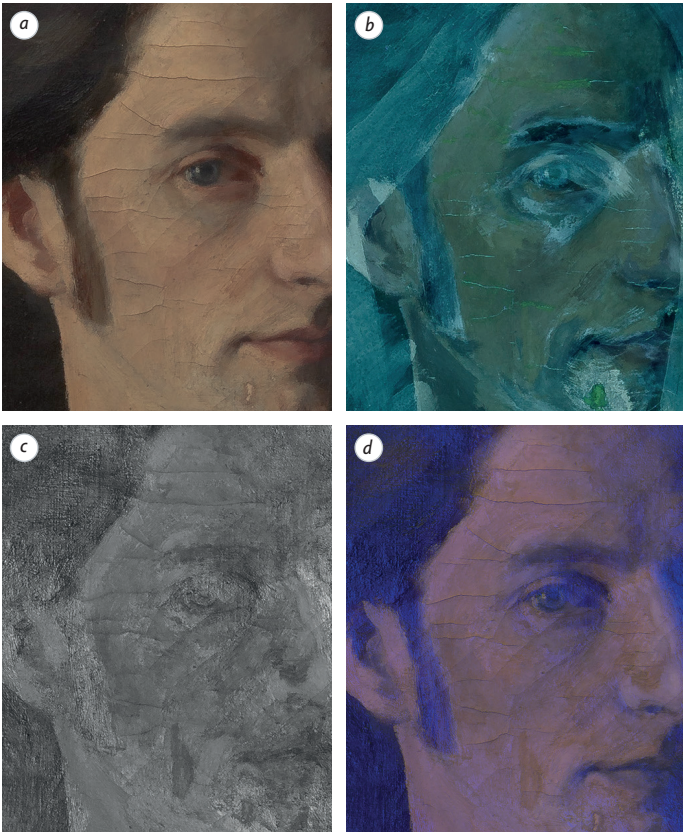
V tomto případě se snímá emise IR záření po expozici předmětu viditelnému světlu, případně jeho různých spektrálních částí. Metodou je možné určit a lokalizovat některé pigmenty, zpravidla egyptskou modř (Obr. 7 vpravo), Han violet a modř, indickou žlut a pigmenty na bázi sloučenin kadmia.^[20]



Obr. 7 Terakotová socha ženy s kachnou a lasturou, Canosa di Puglia, Itálie, 270–200 př. n. l. Vlevo je uveden snímek artefaktu ve viditelném světle (VIS). Na snímku viditelné luminiscence generované viditelným světlem (VIVL, uprostřed) lze snadno lokalizovat použití červeného lakového pigmentu, který se vyznačuje intenzivní oranžovo-červenou luminiscencí. Následuje snímek infračervené luminiscence generované viditelným světlem (VIL, vpravo), na kterém je jasně zvýrazněna polychromie využívající egyptskou modř.^[21] Autor: Joanne Dyer

Falešné barvy (false colors, FC)

Snímky v tzv. falešných barvách se v současné době získávají různými úpravami snímků ze zobrazovacích metod a/nebo jejich vzájemnou kombinací v počítačových programech. Je důležité si uvědomit, že se nejedná o samostatné zobrazovací techniky. Cílem zobrazování ve falešných barvách je zlepšení čitelnosti nebo zvýraznění a zviditelnění různých jevů oproti původním snímkům (Obr. 8). Tímto způsobem lze mnohem lépe rozlišit rozdílné oblasti na základě jejich materiálové podstaty, například podle použitých pigmentů i tehdy, když mají stejnou barevnost i odstín. Tradičně se používají snímky z IR anebo UV reflexe, které jsou daným postupem kombinovány v grafickém programu se snímkem pořízeným klasickou dokumentační metodou v rozptýleném bílém světle za vzniku reflexních snímků ve falešných barvách (UVRFC, IRRFC). Při tomto běžném postupu tvorby UVRFC a IRRFC se potom do vybraného barevného kanálu snímku pořízeného v bílém světle vloží ultrafialový (modrý kanál) nebo infračervený (červený kanál) snímek a ostatní kanály se posunou.^[22] Existuje nesčetně mnoho možností, jak jednotlivé snímky kombinovat a upravovat, a to s různým výsledkem.



Obr. 8 Olejomalba Autoportrét Josefa Voleského ze sbírky Městské galerie v Litomyšli – výřez: a) snímek v rozptýleném bílém světle (VIS); b) ultrafialová fluorescenční fotografie (UVF); c) ultrafialová fotografie (UVR); d) ultrafialová fotografie ve falešných barvách (UVRFC). Na UV fluorescenční fotografii (UVF, 8b) jsou dobře viditelné druhotné, nerovnoměrně nanesené laky vyznačující se intenzivní světle modrou UV fluorescencí. Na UV fotografii (UVR, 8c) se zobrazily retuše na bradě a tváři portrétu, které jsou ještě více zvýrazněné na snímku ultrafialové fotografie ve falešných barvách (UVRFC, 8d), kde se vyznačují okrovou barevností. Fotografie VIS a UVR byly kalibrovány pomocí *ColorChecker Passport Photo 2 (X-Rite)*. Autoři: David Svoboda, Jan Vojtěchovský

22 | Při klasickém postupu tvorby IRRFC se zelený kanál posune na modrý, červený na zelený a červený kanál se nahradí IRR snímkem. V případě tvorby UVRFC se posune zelený kanál na červený, modrý na zelený a modrý kanál se nahradí UVR snímkem. Tento postup byl aplikován u fotografiích ve falešných barvách uvedených v textu. Anita Hayem-Ghez – Elisabeth Ravaud – Clotilde Boust et al., Characterizing pigments with hyperspectral imaging variable false-color composites, *Applied Physics A*, 2015, č. 121, s. 939–947. Antonino Cosentino, Infrared Technical Photography For Art Examination, *E-Preservation Science*, 2016, č. 13, s. 1–6. Lucilla Pronti et al., Spectral Behavior of White Pigment Mixtures Using Reflectance, Ultraviolet-Fluorescence Spectroscopy and Multispectral Imaging, *Applied Spectroscopy*, Society for Applied Spectroscopy, 2017, č. 71 (12), s. 2616–2625. Viz Dyer – Verri – Cupitt (pozn. 4).

23 | Synonymy pro snímač jsou senzor, čip, detektor. CCD (Charged Coupled Device), CMOS (Complementary Meta Oxide Semiconductor) – polovodičové čipy na bázi sloučenin křemíku, převádějí světlo na elektrické pulsy, samotné poskytují monochromatický obraz. Základní rozdíl mezi nimi je ve zpracování dat, respektive metodách sbírání informací. CMOS čip je méně nákladný, rychleji zpracovává data, má nižší spotřebu energie, větší odolnost proti obrazovému šumu i při vysokých ISO oproti CCD čipu. Pavel Tymeš, *Algoritmy interpolace obrazu pro experiment WILLIAM* (bakalářská práce), Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2017.

24 | *Kolari Vision*, Internal Cut Filter Transmission, <https://kolarivision.com/articles/internal-cut-filter-transmission/>, vyhledáno 29. 8. 2020.

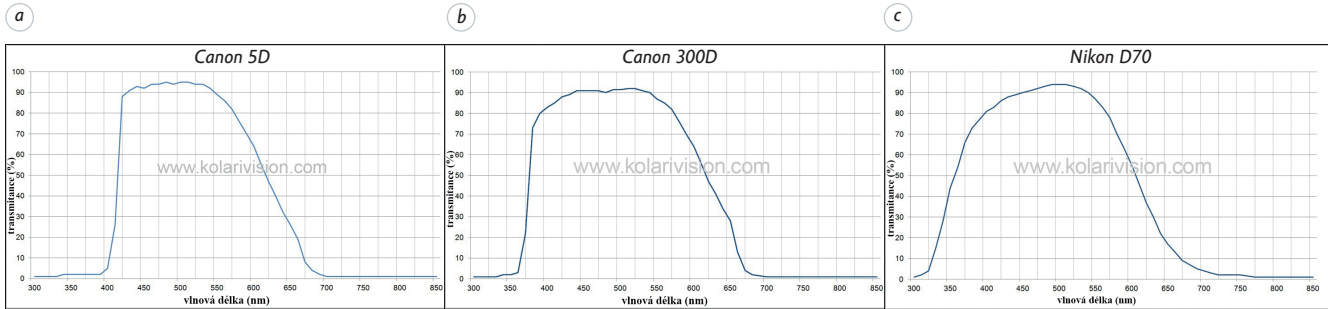
25 | *Kolari Vision*, Internal Cut Filter Transmission, <https://kolarivision.com/articles/internal-cut-filter-transmission/>, vyhledáno 13. 04. 2019. MaxMax, Cameras, <https://www.maxmax.com/maincamerapage>, vyhledáno 30. 8. 2020.

Digitální fotoaparát

Pro běžné účely širokospektrálního, případně multispektrálního zobrazování může uspokojivě posloužit kvalitní digitální zrcadlovka (DSLR). Na tělo fotoaparátu nejsou v podstatě kladeny zvláštní nároky. V zásadě je zapotřebí, aby fotoaparát disponoval dobrým rozlišením obrazového snímače, schopností záznamu surových dat (RAW), manuálním zaostřováním, možností živého náhledu (*live view*), výměny objektivů a představení filtrů.

V současné době jsou masivně využívány CMOS křemíkové polovodičové snímače, které jsou osazeny prakticky v každém telefonu i samostatném fotoaparátu a v podstatě nahradily dříve široce používané CCD senzory. Kvalita obou technologií je však srovnatelná. Pro využití při širokospektrální fotografii je zásadní spektrální odezva čipu, jejíž teoretický rozsah je asi 200–1100 nm. Jedná se o maximální rozsah vlnových délek, které by mohl být senzor schopný zachytit.^[23]

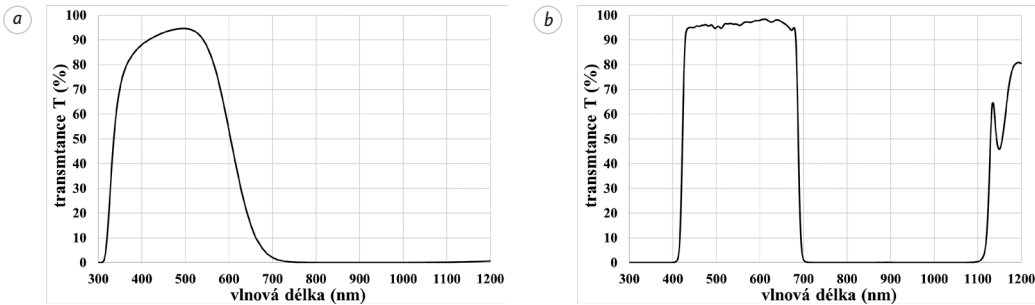
Skutečná citlivost snímače v těle fotoaparátu je však ovlivněna filtry, případně jinými vrstvami, které mají více funkcí. Jsou umístěny před čipem nebo přímo na něm. V kontextu řešené problematiky je zásadní, že upravují záření vstupující do fotoaparátu a dopadající na snímač způsobem vhodným pro fotografování ve viditelném světle. Filtry umístěné před snímačem blokují IR a UV záření, která jsou pro běžnou fotografii nežádoucí. Kombinace a druh těchto filtrů se mohou u jednotlivých fotoaparátů lišit, proto je rozdílný také spektrální rozsah a intenzita záření dopadajícího na jejich čipy (*Obr. 9*).



Obr. 9 Příklady odlišné spektrální citlivosti různých fotoaparátů (Canon 5D, Canon 300D, Nikon D70). Průběh první křivky je v současné době asi nejběžnější. Grafy: *Kolari Vision*, Internal Cut Filter Transmission^[24]

Zpravidla bývá přímo před snímač instalován IR blokační tzv. „hot mirror“ filtr (*ICF / Internal Cut Filter*), který zároveň vhodně upravuje intenzitu propouštěného záření, čímž koriguje barevnost snímku. Na obrázku (*Obr. 10a*) je znázorněn typický tvar jeho transmisní křivky. Za tímto filtrem je většinou umístěn tzv. antialiasingový UV/IR blokační filtr (*AA / „anti-aliasing“*).^[25] u něhož je zejména důležité, že zamezuje průchodu UV záření (*Obr. 10b*). Maximální možný rozsah vlnových délek dopadající na senzor většinou potom díky uvedeným filtrům bývá v přibližném rozmezí 400–700 nm. Znalost transmisní křivky, která je celkovým výsledkem propustnosti zabudovaných filtrů, může být důležitým podkladem k vhodnému výběru fotografických filtrů, které se následně použijí ke snímání upraveným fotoaparátem.

Přímo na čipu se vyskytuje barevný filtr (*CFA / Color Filter Array*), většinou v Bayerově uspořádání (tzv. Bayerův RGB filtr, Bayerova maska/mřížka), a vrstva mikročoček. Bayerova maska je pole barevných mikroskopických filtrů, které jsou šachovnicově uspořádány nad každým pixelem. Detekují zelené, červené a modré světlo. Bayerova maska je nositelem barevnosti získaného obrazu, protože z těchto tří složek lze následně složit jakoukoliv barvu. Mikročočky mají za úkol nasměrovat záření takovým způsobem, aby mohlo být co nejefektivněji využito každým pixelem.



Obr. 10 Příklady transmisních křivek IR a UV/IR blokačních filtrů fotoaparátu, a) IR blokační „hot mirror“ filtr (*ICF*), upravuje intenzitu viditelného světla; b) UV/IR blokační filtr, který je zejména důležitý pro blokaci UV záření (*AA*). Grafy: Ondřej Panák^[26]

Úprava digitálního fotoaparátu

Pro snímání UV a IR záření je nutné fotoaparát náležitě upravit (konvertovat, modifikovat). Konverze digitálních fotoaparátů zahrnují demontáž fotografického zařízení, delikátní odstranění filtrů umístěných před snímačem, nebo dokonce již také vrstev ze snímače. Následuje instalace vhodné vrstvy/filtru s požadovanou spektrální propustností či tloušťkou a refokusace. Proces je náročný na čistotu a přesnost. Proto se doporučuje přenechat modifikaci digitálního fotoaparátu specializované firmě disponující dostatečnou zkušeností i potřebným vybavením. V současnosti se u nás profesionálně upravami digitálních fotoaparátů nikdo nezabývá. V zahraničí je však možné nalézt několik renomovaných firem.^[27] Kromě úpravy fotoaparátů (ať už vlastních používaných, nebo nových) tyto firmy nabízejí adekvátní příslušenství, poskytují celou škálu informací a také určitou garanci.

Úprava fotoaparátu směřující k rozšíření, případně jiné změně snímaného záření, může zahrnovat několik variant závisejících na daném účelu použití. Mezi tyto možnosti patří modifikace citlivosti fotoaparátu pro jednu oblast záření, čili pouze pro UV nebo jen IR záření. Nejčastěji se však využívá rozšíření citlivosti fotoaparátu o obě tyto oblasti. Pro technickou fotografii je zpravidla žádoucí umožnit snímání UV a IR záření v maximální možné intenzitě. Běžná úprava fotoaparátu, která je předmětem tohoto textu, v zásadě spočívá v odstranění IR a UV/IR blokačních filtrů umístěných před čipem. Touto změnou se rozšíří spektrum dopadající na snímač o části UV a IR záření přiléhající k viditelnému světlu. Získá se tak tzv. „full-spectrum“ nebo UV-VIS-IR modifikovaný fotoaparát, který zaznamenává rozsah vlnových délek v přibližném rozmezí 350–1100 nm. Na čipu stále zůstává vrstva mikročoček

26 | Viz Experimentální část – úprava fotoaparátu, výběr fototechniky.

27 | Například *MaxMax*, *Life Pixel*, *Kolari Vision*, *Spencers Camera* a *Advanced Camera Services*.

28 | Adrian Davies, *Digital Ultraviolet and Infrared Photography*, 2018, s. 19–23. David Prutchi, *Exploring ultraviolet photography: bee vision, forensic imaging, and other near-ultraviolet adventures with your dslr*, 1, Buffalo, NY 2016, s. 23–25. Viz Mairinger (pozn. 16), s. 25. Viz Dyer – Verri – Cupitt (pozn. 4), s. 44. Spodní hranice UV záření je ovlivněna Bayerovou maskou.

29 | MaxMax, Phototonic Excellence, <https://www.maxmax.com/main-camerapage/uvcameras>, vyhledáno 30. 8. 2020. Viz Davies (pozn. 28), s. 28. Viz Webb (pozn. 14).

30 | Viz Davies (pozn. 28), s. 34. UV Photography Compatible Lenses, *Kolari Vision*, 2017, <https://kolarivision.com/uv-photography-lens-compatibility/>, vyhledáno 18. 05. 2019. Viz Cosentino (pozn. 3), s. 57.

31 | Viz Davies (pozn. 28), s. 35–38. Problematiku nižší propustnosti objektivů s čočkami potaženými polymerními filmy pro UV záření někteří autoři doporučují řešit použitím starších objektivů, které tyto vrstvy neobsahují a jejich propustnost UV záření je tedy o něco vyšší v porovnání s novými objektivy.

32 | Viz Dyer – Verri – Cupitt (pozn. 4), s. 44. Viz Prutchi (pozn. 28), s. 33–34. Viz Mairinger (pozn. 16), s. 26. Jejich cena se pohybuje v jednotkách tisíc dolarů.

a Bayerova maska, fotoaparátu je tedy ponechána schopnost barevného zobrazování.^[28] Kvůli zvýšené citlivosti čipu je nutné k záznamu viditelného světla s takto modifikovaným fotoaparátem použít filtry, které vhodným způsobem blokují UV a IR záření. Méně častým řešením je potom pořizovat snímky ve viditelném světle (odražené viditelné světlo, viditelná luminiscence) jiným, neupraveným fotoaparátem.

V rámci druhé varianty rozšíření odezvy fotoaparátu o UV a IR záření se odstraňují nejen filtry umístěné před senzorem, ale také vrstva mikročoček a Bayerova maska, které se nacházejí přímo na čipu. Fotoaparát pak snímá pouze monochromaticky, zároveň se zvýší rozlišení snímků a asi šestkrát zintenzivní detekované UV záření. Výsledná citlivost čipu se pohybuje v rozmezí 300–1100 nm. Tato úprava je náročná, také proto, že odstraňované vrstvy mají velmi malou tloušťku (asi 5 µm). V současnosti ji provádí zřejmě pouze jedna firma.^[29] Jelikož nelze takto upravenými fotoaparáty zaznamenávat barevně, je nutné záznam viditelného světla pořizovat jiným/neupraveným fotoaparátem.

Objektivy

Současný trh nabízí nepřeberné množství různě kvalitních fotografických objektivů. Pro dané účely jsou obecně vhodné spíše jednodušší objektivy s pevnou a relativně kratší ohniskovou vzdáleností. Komplikované optické soustavy složitějších objektivů se totiž vyznačují větší pravděpodobností vzniku odlesků, případně jiných vad. Při běžném využití je dále doporučováno vyhnout se objektivům s ohniskovou vzdáleností větší než 200 mm. Tyto objektivy nedovolují dostatečně rychlé snímání při nižších intenzitách záření, což je situace běžná například u UV luminiscenční fotografie.^[30]

Zároveň je nutné si uvědomit, že rozsah i intenzitu elektromagnetického záření dopadajícího do těla fotoaparátu zásadně ovlivňuje právě použitý objektiv. Jinak řečeno, bude-li úpravou těla fotoaparátu teoreticky rozšířena citlivost snímače na maximální rozmezí, může být stále záření filtrováno objektivem v závislosti na charakteru použitých čoček, případně jiných prvků, přes které záření objektivem prochází. Čočky běžných digitálních fotoaparátů jsou vyrobeny ze skla, jejich povrch bývá potažen různými polymerními vrstvami. Tyto materiály omezují procházející záření z hlediska spektrální šíře a intenzity, což bohužel není pro účely širokospektrálního zobrazování žádoucí. Problematická je zejména omezená propustnost skleněných čoček pro UV záření. Čočky většinou nepropouští záření s vlnovými délkami kratšími než 330 nm, v některých případech dokonce 360 nm. I přes tuto skutečnost lze objektivy s běžnou optikou úspěšně využít při širokospektrálním, potažmo multispektrálním zobrazování.^[31]

Záznam širšího UV spektra potom umožňují speciální objektivy. Jejich optická soustava není vyrobena ze skla, ale z křemenných, případně fluoridových čoček. Jejich použitím se rozšíří hranice záření dopadajícího do fotoaparátu na přibližných 220 nm. Kvůli vysoké ceně se tyto objektivy běžně nevyužívají.^[32]

Objektiv vhodný pro širokospektrální fotografii by neměl být náchylný k tzv. „hotspot“ jevu. Ten se projevuje jako světlé mlhavé místo uprostřed IR reflexních snímků. Je způsoben odrazem infračerveného záření mezi jednotlivými prvky uvnitř objektivu.^[33] Výběru vhodného objektivu může napomoci studium specializovaných internetových stránek, kde jsou shromážděny informace o tom, které objektivy se tvorbou „hotspot“ jevů vyznačují a které nikoliv. Dále je možné inspirovat se zkušenostmi a vybavením odborníků, kteří se širokospektrální fotografií zabývají, nebo objektiv vyzkoušet u prodejce.^[34]

Fotografické filtry

Hlavní úlohou optických filtrů je požadovaným způsobem změnit spektrální hustotu procházejícího záření nebo jinak modifikovat záření prošlé filtrem.^[35] Zjednodušeně lze říci, že filtry mají za úkol pustit na filtr jen to spektrum záření, které potřebujeme pro pořízení vybraného typu snímku (UVR, IRR, VIS apod.). Pomocí filtrů se upravuje nejen záření dopadající na čip fotoaparátu, ale také některá zdrojová záření (Obr. 11). V restaurátorské praxi se zpravidla využívají fotografické filtry, které se montují na objektiv fotoaparátu. Na trhu jich lze nalézt nepřeberné množství v různých variantách. Volba vhodného filtru či jejich optimální kombinace je zásadním krokem k získání správného, přesného i jasně definovaného výsledku. Výběr filtrů musí být podmíněn znalostí jejich spektrální (transmisní) křivky (grafu), tedy závislosti relativní intenzity záření prošlého filtrem (transmitance T , %) na vlnové délce (λ , nm) v dostatečném rozsahu. Křivku obvykle poskytuje dodavatel/výrobce filtru. V případech, kdy tomu tak není, je možné graf nalézt v literatuře nebo na specializovaných internetových stránkách. Další, pro běžnou praxi méně schůdnou variantou je změření transmisní křivky filtru spektrofotometricky.

Při výběru filtru bývají rozhodující hraniční vlnové délky, případně vlnová délka při 50% transmitanci, tvar či strmost hraničních úseků transmisní křivky a intenzita propouštěného záření. Tyto vlastnosti jsou definovány i tloušťkou filtru a je nutné kontrolovat, aby křivka skutečně odpovídala tloušťce použitého filtru. Výběr filtrů může být dále ovlivněn původní spektrální citlivostí fotoaparátu.

Požadované vlastnosti a specifikace fotografických filtrů vhodných pro vědeckou fotografii jsou rámcově uvedeny v dalších odstavcích. Ne vždy jsou k dispozici filtry, které by samostatně propouštěly požadovaný spektrální rozsah záření. V těchto případech je nutné použít více filtrů, zpravidla dva, jejichž kombinací se dosáhne optimálního výsledku.

Odražené bílé světlo (VIS), UV luminiscence (UVL)^[36]

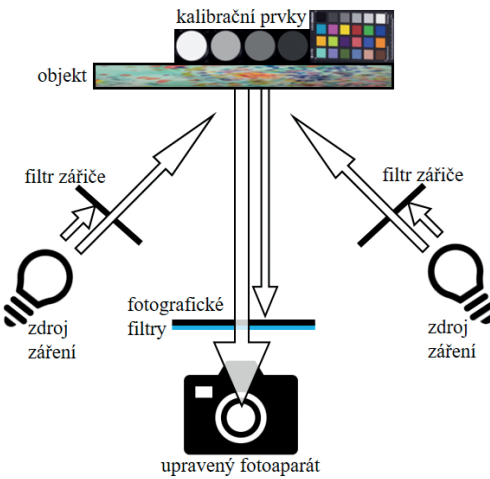
Při obou technikách se snímá viditelné světlo, proto mají stejné nároky na fotografické filtry. Je důležité si znovu uvědomit, že po modifikaci fotoaparátu již neodpovídá jeho záznam skutečné barevnosti. K získání uspokojivých snímků odraženého světla a UV luminiscence je však nutné, aby v konečném výsledku na senzor dopadalo světlo v rozmezí od 400 nm do 700 nm, v ideálním případě by měl být tvar spektrální křivky

33 | Oldřich Lepil, *Fyzika pro gymnázia*, 4. vyd., Praha 2010, s. 13–25. Viz Cosentino (pozn. 3), s. 57.

34 | DigiManie, Objevte svět infrafotografie, Michal Srna, dostupné z: <https://www.digimanie.cz/objevte-svet-infafotografie/3312-2>, vyhledáno 30. 8. 2020. Kolari Vision, Lens Hotspot Database, dostupné z: <https://kolarivision.com/articles/lens-hotspot-list/>, vyhledáno 30. 8. 2020.

35 | Například polarizaci záření. J. A. Dobrowolski, Part 11: Optical Properties of Films and Coatings, in: *Handbook of Optics I*, ed. Michael Bass, 1995, s. 42.

36 | Viz Cosentino (pozn. 3). Viz Dyer – Verri – Cupitt (pozn. 4). Luis Bravo, UV fluorescence photography of works of art: replacing the traditional UV cut filters with interference filters, *International Journal of Conservation Science*, 2010, č. 1 (3), s. 161–166. Viz Studeník Milionová – Lesniaková – Vojtěchovský (pozn. 18).



Obr. 11 Schematické znázornění obecného uspořádání fotografické techniky při pořizování technické fotografie. Autorka schématu: Petra Lesniaková

37 | Při programovém zpracování snímků v odraženém bílém světle je vždy nutné získané fotografie barevně kalibrovat. V praxi k tomuto účelu slouží barevné kalibrační tabulky.

38 | Luis Bravo Pereira, UV fluorescence photography of works of art: replacing the traditional UV cut filters with interference filters. International Journal of Conservation Science, 2010, č. 1 (3), s. 161–166. Viz Cosentino (pozn. 3).

39 | Viz Cosentino (pozn. 22). Antonino Cosentino, Multispectral imaging of pigments with a digital camera and 12 interferential filters, e-Preservation Science, 2015, č. 12, s. 1–7.

v této oblasti podobný jako u neupraveného fotoaparátu. Pomocí filtrů by měl tedy být znovu eliminován dopad UV a IR záření na snímač, zároveň by měly být vhodně upraveny spektrální rozsah a intenzita dopadajícího světla, případně simulována původní citlivost fotoaparátu.^[37]

K tomuto účelu se používají IR, UV/IR, případně UV blokační filtry a jejich různé kombinace. Mohou jimi být IR blokační filtry, které disponují spektrální křivkou podobnou jako u původního IR blokačního „hot mirror“ (ICF) filtru odstraněného z fotoaparátu. Přestože tyto filtry zároveň upravují intenzitu světla, většinou je nelze použít samostatně, protože v různé míře propouštějí nežádoucí část UVA záření. Bývá tedy zapotřebí použít druhý filtr, který tuto část UV záření blokuje, zároveň však musí tento filtr propouštět viditelné světlo. Lze použít UV/IR blokační filtry, případně pouze UV blokační filtry, které se vyznačují velkou strmostí hraničních částí transmisních křivek.

Úskalím UV blokačních filtrů může být jejich případná nežádoucí UV luminiscence, kterou lze pozorovat při expozici filtru UV záření. Je lepší takové filtry nepoužívat, jelikož vzniklá UV luminiscence může být natolik intenzivní, že znehodnotí výsledný obraz. Nejvíce k uvedenému jevu dochází, když je fotoaparát v blízkosti zdroje UV záření a snímaného předmětu. Dále je nutné upozornit, že k daným účelům nemusí být vhodné většinou levné, ochranné filtry, někdy nazývané UV ochranné filtry nebo „skylight“ filtry, které nedisponují nutnými parametry.

Viditelná luminiscence indukovaná viditelným světlem (VILV)

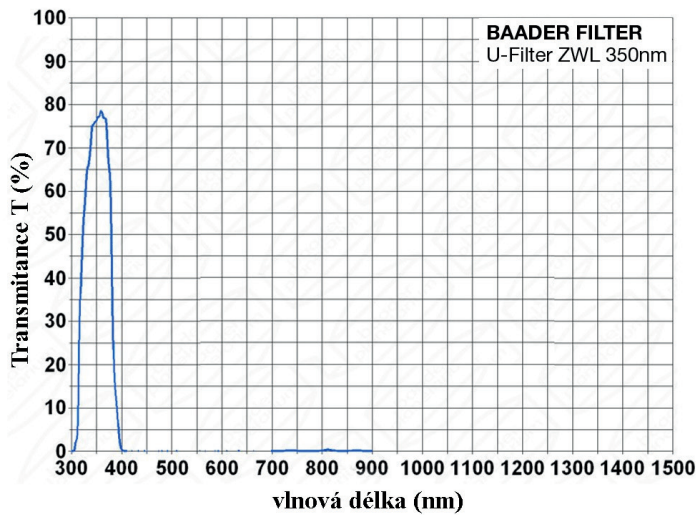
V tomto případě je předmět zpravidla nasvícen světlem s relativně úzkou spektrální šířkou, zaznamenává se oblast viditelného světla s delšími vlnovými délkami. Používají se filtry, které blokují záření do vlnových délek viditelného světla navazujících na spektrum použitého zdroje. Filtr je nutné u upraveného fotoaparátu kombinovat s filtrem blokujícím IR záření, k čemuž se používají UV/IR blokační filtry. Nejběžnější technika je založena na snímání viditelné luminiscence buzené modrým světlem, jehož spektrální rozmezí bývá asi 400–500 nm. Potřebný filtr tedy musí blokovat záření do vlnové délky asi 500 nm, aby na snímač mohlo v kombinaci s UV/IR blokačním filtrem dopadat záření v přibližném rozmezí 500–700 nm.^[38]

Infračervená fotografie/reflektografie a luminiscence (IRR, VIL)

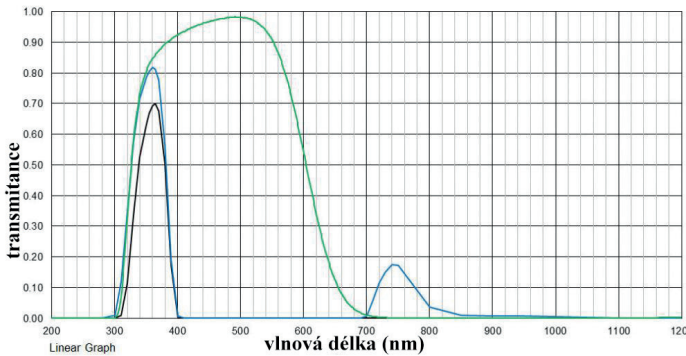
U těchto technik je zapotřebí použít filtry, které propouštějí pouze IR záření v maximální intenzitě, tedy přibližně od 700 nm. S různě propustnými filtry pro IR záření lze získat do určité míry odlišné informace a značně tak rozšířit poznání o předmětu a jeho materiálové podstatě. Často se používají také filtry propouštějící IR záření od vlnových délek blízkých konečné citlivosti senzoru, což bývá přibližně od 900 nm. Na senzor potom dopadá IR záření v přibližném rozmezí od 900 do 1100 nm, pro které je nejvíce pigmentů propustných, a lze tak získat nejvíce informací o skrytých vrstvách včetně podkreseb. Dále je možné při postupném použití většího počtu filtrů pro NIR oblast získat sekvenci snímků, respektive její část, pro multispektrální zobrazování.^[39]

Ultrafialová fotografie/reflektografie (UVR)

Při ultrafialové fotografii je nutné, aby bylo filtrem propouštěno pouze UVA záření v maximální intenzitě, k čemuž by teoreticky mohl postačovat jeden filtr. V praxi je situace složitější. Kvalitní filtry propustné pouze pro UV záření jsou relativně drahé (Obr. 12). Mnohé fotografické filtry v nižší cenové kategorii dobře propustné pro UV záření však propouštějí také IR záření nebo jeho oblast, případně část viditelného světla blízkou IR oblasti. V těchto případech je nezbytné takovýto UV propustný filtr kombinovat s filtrem, který nežádoucí záření blokuje a zároveň vhodně propouští UV záření. K tomuto účelu se často používají IR blokační filtry typu „hot mirror“ které blokují UV záření omezeně tak, že propouštějí oblast UVA záření (Obr. 13).^[40]



Obr. 12 UV fotografie, transmisní křivka kvalitního UV propustného filtru, který lze použít samostatně. Graf: Baader Planetarium, Baader U-Venus-Filter^[41]



Obr. 13 UV fotografie; transmisní křivka UV propustného filtru (modrá linka, U-360 d = 2 mm), který zároveň propouští nežádoucí VIS oblast v rozmezí 700–830 nm, transmisní křivka filtru, který tento nedostatek ve velké míře kompenzuje (zelená linka, S8612 d = 1 mm) a výsledné spektrum záření propouštěného kombinací obou filtrů (černá linka). Graf: Ultraviolet Photography, U-360 d = 2 mm, S8612 d = 1 mm, U-360 2 mm + S8612 1 mm^[42]

40 | Viz Dyer – Verri – Cupitt (pozn. 4), s. 50. Viz Cosentino (pozn. 3).

41 | Baader Planetarium, Baader U-Venus-Filter 2", dostupné z: [https://www.baader-planetarium.com/en/filters/baader-u-filter-\(venus-and-uv-350nm\).html](https://www.baader-planetarium.com/en/filters/baader-u-filter-(venus-and-uv-350nm).html), vyhledáno 1. 9. 2020.

42 | Ultraviolet Photography, U-360 d = 2 mm, S8612 d = 1 mm, U-360 2 mm + S8612 1 mm, <http://www.ultravioletphotography.com/content/index.php/topic/1646-baader-u-u-360-ug11-zwb1-stacks-compared>, vyhledáno 30. 8. 2020.

43 | Garance je většinou zaručená na dobu 1 roku. V úvahu například přicházely následující firmy: *MaxMax*, *Life Pixel*, *Kolari Vision*, *Spencers Camera* a *Advanced Camera Servises*. Viz Davies (pozn. 28), s. 28.

Na základě rešerše odborné literatury i průzkumu specializovaných internetových stránek bylo pořízeno základní fotografické vybavení pro širokospektrální fotografii v UV-VIS-IR oblasti záření (Tab. 3). Tato část textu se zaměřuje na výběr fotoaparátu a jeho úpravu i výběr objektivů a fotografických filtrů. Zamýšleným rozsahem širokospektrálních metod byla fotografie v odraženém bílém světle, UV fotografie, IR fotografie v několika oblastech IR záření a UV luminiscenční fotografie, případně viditelná luminiscenční fotografie buzená modrým světlem.

Tab. 3 Přehled základní pořízené fotografické techniky pro UV-VIS-IR širokospektrální fotografii.

Vybavení, úprava	Přesný typ, firma	Poznámka, důležité údaje
Digitální zrcadlovka	Canon EOS 80D, Canon, SLR	rozlišení 24,2 Mpx, obrazovka s variabilním úhlem otočení
Úprava fotoaparátu	UV-VIS-IR / full-spectrum, Life Pixel	renomovaná firma, kvalitní postup, cena, garance 1 rok
Základní objektiv	Canon EF50 mm f/1,8 STM, Canon	pevné ohnisko bez sklonu k „hotspot“ jevu
Filtry:		
Technika	Přesný typ, firma	Poznámka, důležité údaje, průměr/tloušťka
Odražené bílé světlo (VIS)	X-Nite CC1, MaxMax	IR blokační „hot mirror“ filtr, Ø 52 mm/2 mm
UV luminiscence (UVL)	Astronomik L-3 M52, Astronomik	UV/IR blokační filtr, Ø 52 mm
IR fotografie (IRR)	X-Nite 1000B, MaxMax	IR propustný filtr, Ø 52 mm/2,2 mm
	RG 830, Heliopan	IR propustný filtr, Ø 52 mm/0,75 mm
	RG 780, Heliopan	IR propustný filtr, Ø 52 mm/0,75 mm
	RG 715, Heliopan	IR propustný filtr, Ø 52 mm/0,75 mm
UV fotografie (UVR)	Baader U-Venus 2“, Baader	UV propustný filtr, Ø 2“/2 mm, nutné přechodky z Ø 2“
VIS luminiscence buzená modrým světlem	Gelb 15 SH PMC, Heliopan	filtr propustný od cca 510 nm, Ø 52 mm/0,75 mm

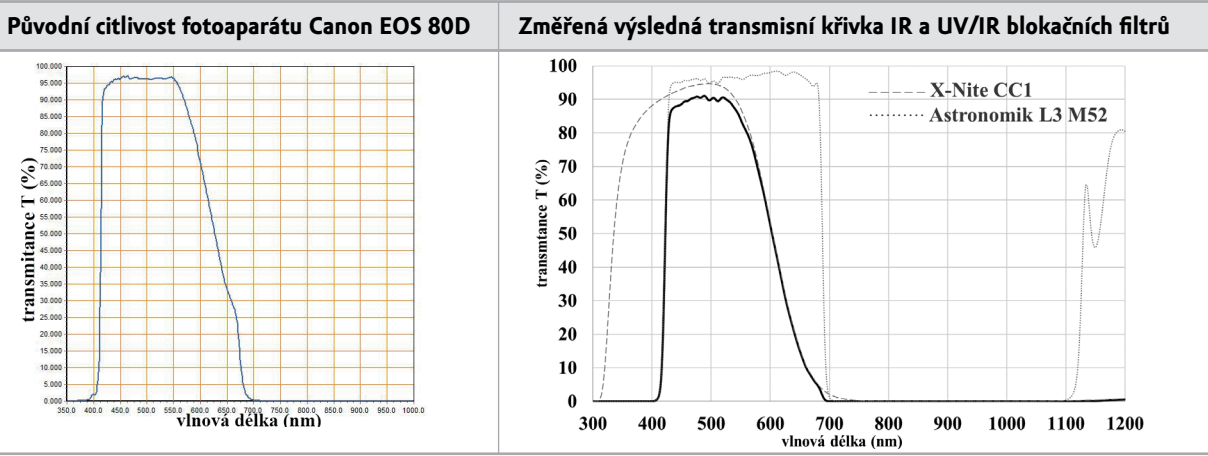
Pro účely práce byla zvolena digitální zrcadlovka střední kvality *Canon EOS 80D*, která plní uvedené požadavky pro technickou fotografii (kapitola Digitální fotoaparát). Zvolený výrobce byl vybrán kvůli předpokládané vysoké kvalitě a možnosti kompatibility nového zařízení s fototechnikou, kterou již bylo pracoviště vybaveno. Dále byla dohledána křivka původní citlivosti fotoaparátu (Tab. 4) podmiňující následný výběr IR a UV/IR blokačních filtrů pro techniky snímání odraženého světla a UV luminiscence. Jak bylo uvedeno, úprava fotoaparátu zahrnovala tzv. „full-spectrum“ konverzi rozšiřující jeho citlivost o UV a IR oblasti záření odstraněním filtrů umístěných před senzorem (kapitola Úprava digitálního fotoaparátu). Z nalezených renomovaných firem zaručujících určitou garanci^[43] a také kvůli relativně nižší celkové ceně dodaného nového konvertovaného fotoaparátu byla vybrána firma *Life Pixel*.

Jako objektiv pro základní využití byl zvolen *Canon EF 50 mm f/1,8 STM* (*Canon*). Jedná se o objektiv s pevnou ohniskovou vzdáleností, který nebyl v internetových databázích veden mezi nevhodnými objektivy pro širokospektrální fotografii například kvůli výskytu „hotspot“ jevu. Dále mohly být vyzkoušeny/využity také jiné kompatibilní objektivy vhodné pro danou situaci v praxi, které jsou na pracovišti k dispozici.

Filtry byly vybrány tak, aby jejich spektrální křivky co nejpřesněji splňovaly požadavky jednotlivých technik. Nalezené křivky byly ověřeny spektrofotometrickým měřením. Měření průchodu záření fotografickými filtry bylo realizováno na Fakultě chemické technologie Univerzity Pardubice, Katedře polygrafie a fotofyziky. Měření provedl Ing. et Ing. Ondřej Panák, Ph.D. na spektrofotometru *Shimadzu UV-3600Plus UV-VIS-NIR* v rozsahu vlnových délek 300–1200 nm a krokem 2 nm.

Filtry pro snímání viditelného odraženého světla byly vybrány tak, aby výsledná transmisní křivka při jejich současném použití měla hraniční blokované vlnové délky 400 a 700 nm, případně aby co nejvíce kopírovala původní citlivost fotoaparátu v této oblasti spektra (Tab. 4). Pro tento účel se většinou používají vzájemné kombinace IR blokačních filtrů typu „hot mirror“ s UV/IR nebo UV blokačními filtry.^[44] K dosažení optimálního výsledku byl v našem případě kombinován IR blokační filtr (*X-Nite CC1*, *MaxMax*) s UV/IR blokačním filtrem (*Astronomik L3 M52*, *Astronomik*). Jak může být patrné z grafů v tabulce (Tab. 4), UV/IR blokační filtr důsledně propouští světlo v rozmezí 400 až 700 nm, přičemž IR blokační filtr zároveň optimálně koriguje jeho intenzitu (Tab. 5) podobně, jako tomu bylo u původní citlivosti fotoaparátu.

Tab. 4 Původní citlivost digitální zrcadlovky *Canon EOS 80D* (*Canon*) ve srovnání s výslednou transmisí vybraných IR a UV/IR blokačních filtrů (*X-Nite CC1*, *MaxMax* + *Astronomik L3 M52*, *Astronomik*). Grafy: *Kolari Vision*^[45] a Ondřej Panák



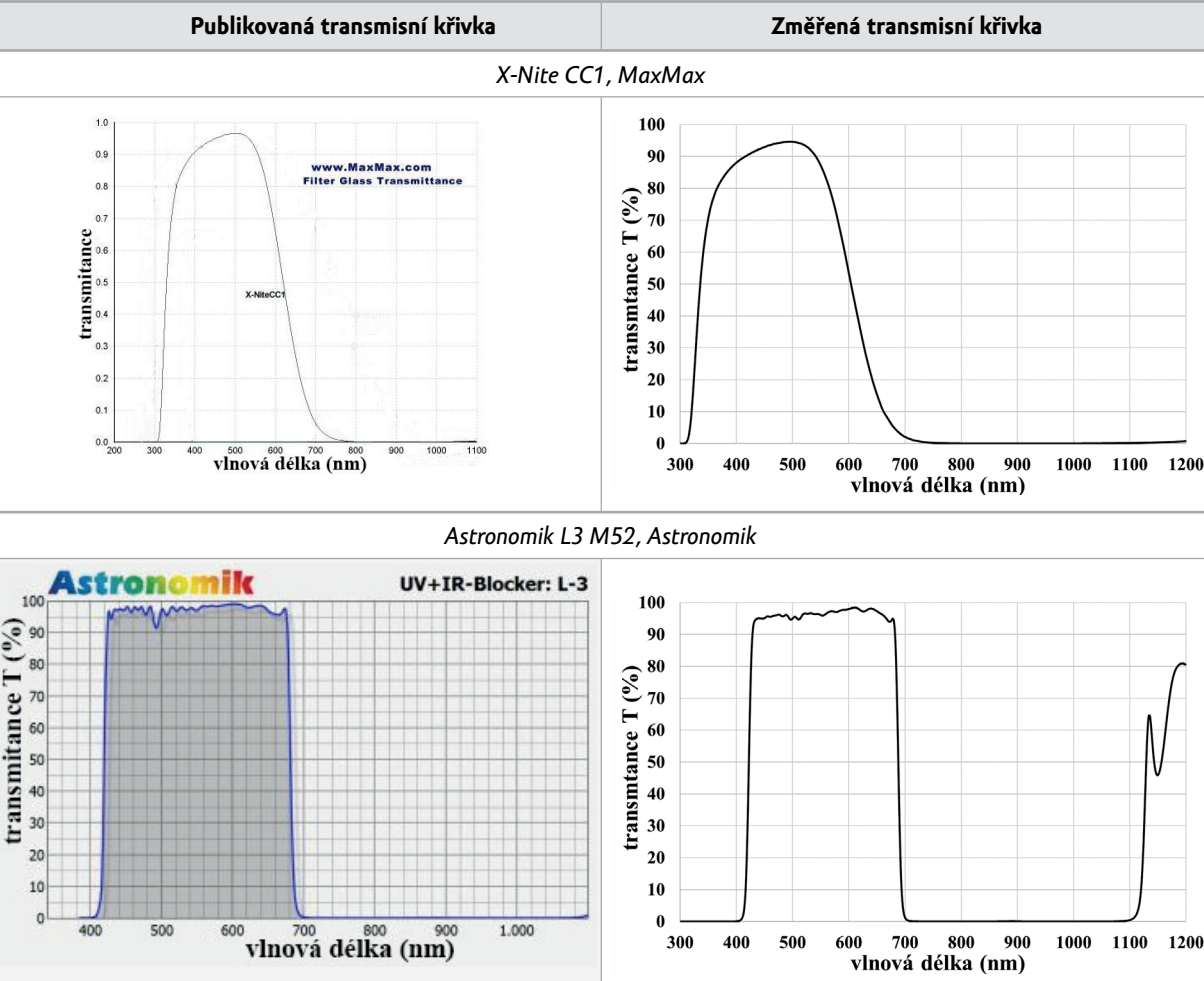
Velikost filtrů byla zvolena kompromisně větší (Ø 52 mm), než je průměr závitu základního objektivu (49 mm), z toho důvodu, aby bylo možné filtry použít i na objektivy většího průměru a zároveň aby jejich cena byla přijatelná.

Ke kompenzaci rozměrů závitů filtrů a objektivů se používají běžně dostupné redukční kroužky. Pro techniku UV fotografie byl vybrán UV propustný filtr Baader U-Venus 2“ (Baader), který se vyznačuje atypickým průměrem pro použití na objektivy digitálních fotoaparátů. Aby mohl být filtr namontován na fotografický objektiv, bylo zapotřebí u výrobce filtru zakoupit dva speciální přechodové kroužky. Filtry s průměrem v jednotkách palců jsou totiž původně vyráběny pro hvězdářskou techniku (dalekohledy). Tento filtr byl vybrán kvůli vynikajícím, zřejmě z aktuální nabídky dokonce teoreticky nejlepším optickým parametrům (Tab. 6) a dobré garanci.

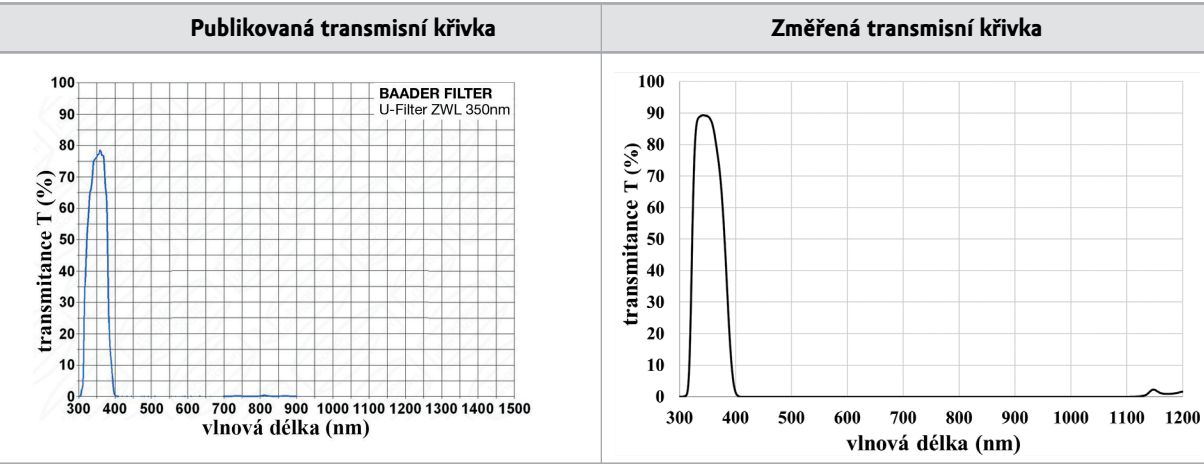
44 | Příklady vhodných UV blokačních filtrů jsou Zeiss T* UV filter nebo Marumi UV cut filter. Zeiss, Zeiss T* UV filter, dostupné z: <https://www.zeiss.com/content/dam/consumer-products/downloads/photography/datasheets/en/filter/datasheet-zeiss-uv-filter-en.pdf>; Marumi, UV cut & Lens Protect, dostupné z: <https://www.marumi-filter.co.jp/en/product/08/>, oboje vyhledáno 1. 9. 2020.

45 | Spektrální křivku laskavě zaslala na základě e-mailové komunikace firma *Kolari Vision*. Za tímto účelem byla oslovena také firma *Canon*, která spektrální křivky citlivosti fotoaparátů neposkytuje.

Tab. 5 Přehled transmisních křivek IR a UV/IR blokačních filtrů, které jsou v kombinaci určeny pro snímání odraženého viditelného světla a UV fluorescence. Grafy: X-Nite CC1, IR filters, Astronomik, Astronomik Luminance filter L-3^[46] a Ondrej Panák



Tab. 6 Přehled transmisních křivek fotografického filtru Baader U-Venus 2" (Baader) pořízeného pro UV fotografii. Grafy: Baader Planetarium, Baader U-Venus-Filter 2"^[47] a Ondrej Panák



46 | X-Nite CC1, IR filters, dostupné z: <https://maxmax.com/filters>, vyhledáno 2. 9. 2020. Astronomik, Astronomik Luminance filters L-1, L-2 and L-3, dostupné z: https://www.astronomik.com/en/uv-und-ir-block-filter/luminance-filter-l-1-l-2-l-3.html?__store=en, vyhledáno 30. 9. 2020.

47 | Baader Planetarium, Baader U-Venus-Filter 2", dostupné z: [https://www.baader-planetarium.com/en/filters/baader-u-filter-\(venus-and-uv-350nm\).html](https://www.baader-planetarium.com/en/filters/baader-u-filter-(venus-and-uv-350nm).html), vyhledáno 1. 9. 2020.

Kromě spektrálního rozsahu propouštěného záření byla pro výběr tohoto filtru také určující jeho intenzita. Ta je vzhledem k nízké citlivosti upraveného fotoaparátu k UV záření v porovnání s ostatními oblastmi spektra krucální. Dalšími důvody bylo vyhnout se použití méně kvalitních složenin ze dvou filtrů, jejichž montáž na objektiv navíc není příliš praktická. Výsledné UV fotografie zahrnující neupravený snímek přímo pořízený z fotoaparátu a snímek převedený do černobílé stupnice, jsou ilustrovány na obrázku (Obr. 14).

Nabídka IR propustných filtrů je široká, přesto většinou mívají transmisní křivky filtrů od různých výrobců/dodavatelů vyhovující a u stejných typů IR propustných filtrů také srovnatelný standardní průběh. Důležité je, aby byla přechodová oblast křivky mezi blokovanou a propustnou částí spektra záření co nejvíce strmá. Dále by měly filtry propouštět IR záření v co největší míře (Obr. 15), čili transmise (transmittance) v požadované oblasti IR záření by měla být co nejvyšší.

Základní IR propustné filtry (Tab. 7) byly vybrány tak, aby postihovaly celou oblast IR záření (RG 715, Heliopan) nebo aby naopak propouštěly jeho hraniční část, kterou je snímač schopný zachytit (X-Nite1000B, MaxMax). Dále byly vybrány filtry propustné pro IR záření od vlnových délek mezi uvedenými oblastmi. Jejich výběr byl taktéž podmíněn studiem literatury (RG 830, RG 780, Heliopan).

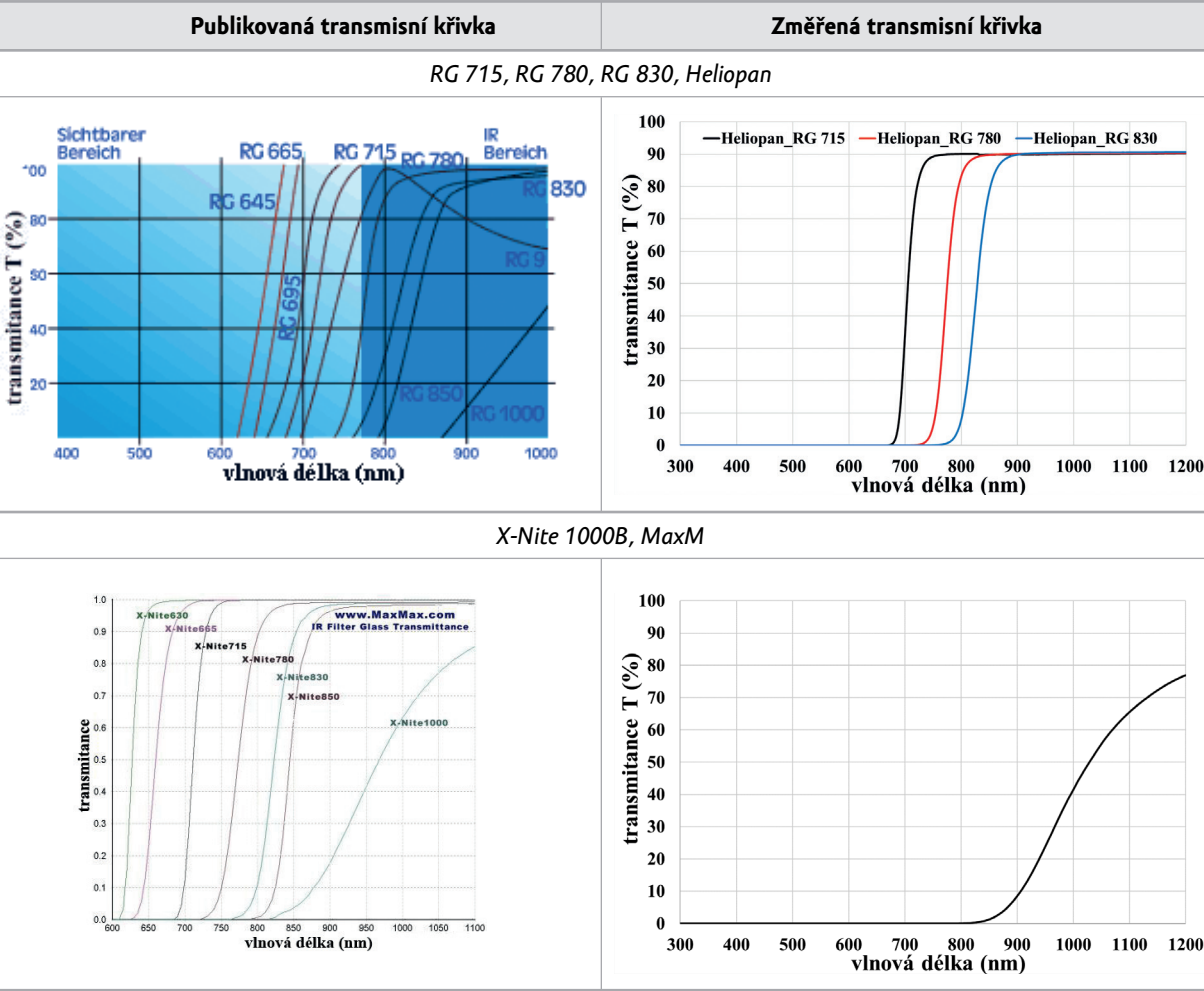


Obr. 14 Ukázka snímků pořízených uvedenou fototechnikou a příslušnými filtry na olejomalbě Bakchův triumf od Johanna George Platzera (50.–60. léta 18. stol.): a) snímek v rozptýleném viditelném světle (VIS); b) neupravený ultrafialový snímek (UVR) získaný z fotoaparátu; c) ultrafialová fotografie (UVR) převedená do černobílé škály. UVR fotografie byla kalibrována pomocí ColorChecker Passport Photo 2 (X-Rite). Autoři: David Svoboda, Jan Vojtěchovský

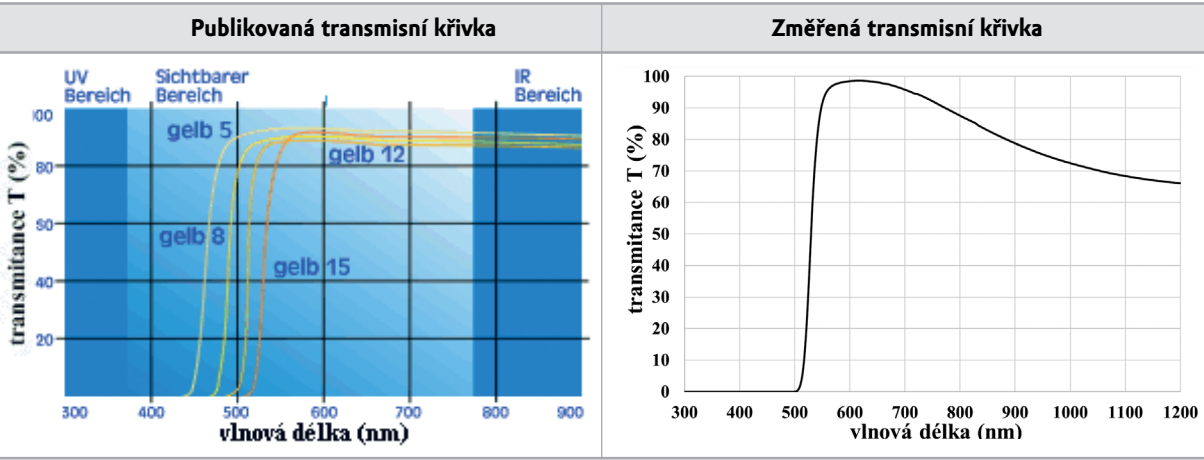


Obr. 15 Ukázka snímků pořízených uvedenou fototechnikou a příslušnými filtry na olejomalbě Bakchův triumf od Johanna George Platzera (50.–60. léta 18. stol.): a) snímek v rozptýleném viditelném světle (VIS); b) neupravený infračervený snímek (IRR, filtr X-Nite1000B) získaný z fotoaparátu; c) infračervená fotografie (IRR) převedená do černobílé škály. IRR fotografie byla kalibrována pomocí ColorChecker Passport Photo 2 (X-Rite). Autoři: David Svoboda, Jan Vojtěchovský

Tab. 7 Přehled jednotlivých transmisních křivek fotografických filtrů pro snímání IR fotografie. Grafy: Heliopan, Infrarotfilter, MaxMax, IR Filters^[48] a Ondrej Panák



Tab. 8 Přehled transmisních křivek filtru Gelb 15 SH PMC (Heliopan), který bude použit v kombinaci s UV/IR blokačním filtrem Astronomik L3 M52 pro VIS luminiscenci buzenou modrým světlem. Grafy: Heliopan, Schwarz-weiss-Filter^[49] a Ondrej Panák



⁴⁸ | Heliopan, Infrarotfilter, dostupné z: <http://www.heliopan.de/produkte/infrarotfilter/>; MaxMax, IR Filters, dostupné z: <https://maxmax.com/filters>, vyhledáno 2. 9. 2020.

⁴⁹ | Heliopan, Schwarz-weiss-Filter, dostupné z: <http://www.heliopan.de/produkte/schwarz-weiss-filter/>, vyhledáno 2. 9. 2020.

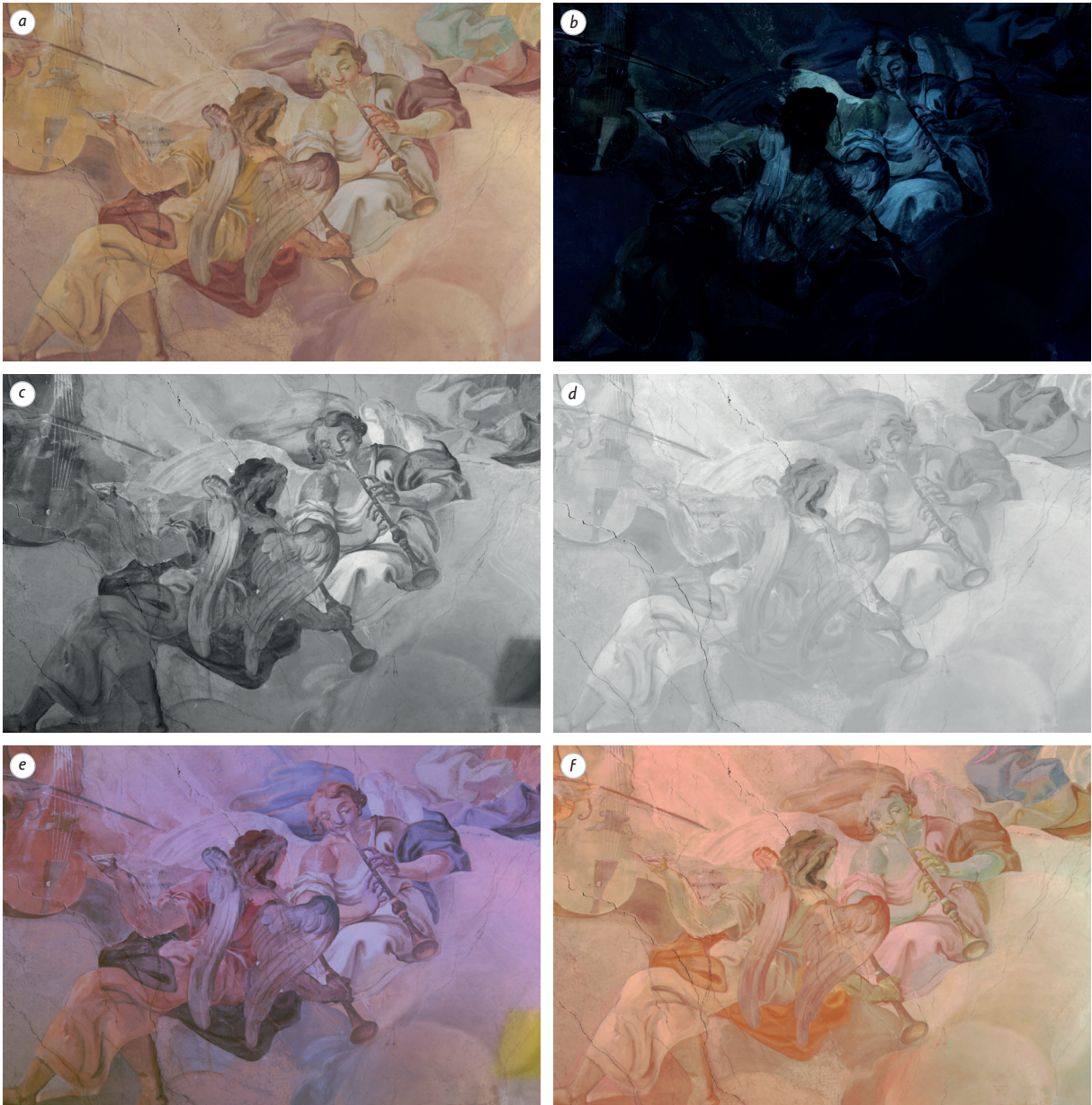
V neposlední řadě byl zakoupen filtr pro snímání viditelné luminiscence generované modrým světlem (*Gelb 15 SH PMC, Heliopan*). Výběr filtru se částečně řídil předpokládaným spektrálním rozsahem zdroje modrého záření tak, aby na něj propustnost filtru navazovala (*Tab. 8*). Naměřená transmisní křivka tohoto filtru zcela nekorespondovala v oblasti delších vlnových délek s grafem uvedeným na internetových stránkách výrobce. Pro daný účel použití ve viditelné oblasti spektra je však křivka vyhovující, dokonce se v této oblasti zřejmě vyznačuje vyšší propustností. Filtr je nutné použít v kombinaci s filtrem blokujícím IR záření. V tomto případě bude kombinován s UV/IR blokačním filtrem, který důsledně blokuje IR záření od vlnové délky 700 nm (*Astronomik L3 M52, Astronomik*).

Závěr

Článek představuje část rozsáhlejší studie zaměřené na základní metody širokospektrální (technické) fotografie, které je možné zajistit i poměrně finančně dostupnou digitální fotografickou technikou, respektive speciálně upraveným digitálním fotoaparátem s příslušnými filtry. Podařilo se zde popsat základní metody technické fotografie, mezi které lze zařadit snímání odraženého bílého světla, ultrafialovou fotografii, infračervenou fotografii v několika oblastech infračerveného záření a UV luminiscenční fotografii, ale také méně známé techniky, například infračervenou luminiscenci generovanou bílým světlem nebo viditelnou luminiscenční fotografii buzenou modrým světlem.

Cílem předkládaného textu bylo v teoretické i praktické rovině metodicky popsat možnosti modifikace fotoaparátu a výběr vhodné fotografické techniky s příslušnými fotografickými filtry. Na základě rešerše literatury a průzkumu trhu byla k uvedenému účelu vybrána digitální zrcadlovka *Canon EOS 80D*, přičemž fotoaparát byl specializovanou profesionální firmou modifikován v rámci „full spectrum“ konverze, kterou se rozšiřuje jeho citlivost o části ultrafialového (UV/UVA) a infračerveného (IR/NIR) záření přilehlého k viditelnému spektru na konečné rozmezí 350–1100 nm. Na základě spektrální křivky původní citlivosti fotoaparátu a transmisních křivek fotografických filtrů publikovaných jejich výrobcí či dodavateli byly pořízeny filtry s vhodnými optickými vlastnostmi pro jednotlivé vybrané metody technické fotografie (*Tab. 3*). Deklarovaná propustnost filtrů byla následně orientačně ověřována spektrofotometrickým měřením, na jehož základě bylo zjištěno, že všechny pořízené filtry odpovídají požadovaným kritériím.

Předmětem navazujícího článku bude výběr zbývajících fotografického příslušenství, zejména zdrojů záření a objektivizačních prvků. Dále bude řešena problematika optimálních postupů získávání snímků, jejich kalibrace, standardizace a zpracování v grafických programech včetně falešných barev.



Obr. 16 Ukázka série výsledných snímků získaných pořízenou fototechnikou, nástěnná malba nad východní částí hudebního kůru v kostele sv. Petra a Pavla v Rajhradu: a) fotografie ve viditelném světle (VIS); b) ultrafialová fluorescenční fotografie (UVF); c) ultrafialová fotografie (UVR) převedená do černobílé barevnosti; d) infračervená fotografie (IRR) převedená do černobílé barevnosti; e) ultrafialová fotografie ve falešných barvách (UVRFC); f) infračervená fotografie ve falešných barvách (IRRFC). Fotografie VIS, UVR a IRR byly kalibrovány pomocí ColorChecker® Classic (X-Rite). Autoři: David Svoboda, Jan Vojtěchovský

Poděkování

Práce byla realizována v rámci projektu SGS_2019_015, finančně podpořeného grantem Interní grantové agentury Univerzity Pardubice (IGA UPa). Poděkování dále patří Ing. et Ing. Ondreji Panákovi, Ph.D. z Katedry polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice za jeho ochotu a naměření transmisních křivek fotografických filtrů.

SUMMARY

TECHNICAL PHOTOGRAPHY FOR EXAMINATION OF WORKS OF ART.
DEFINITION OF TERMS AND CHOICE OF SUITABLE EQUIPMENT

The study focuses on technical photography, which can be achieved thanks to relatively affordable photographic equipment, specifically a “full-spectrum” modified (converted) digital camera with appropriate optical filters. The aim of the text is to present optimal working procedures of acquisition and post-processing good quality images with a relatively high informative value, as well as to help with the selection of suitable equipment. The range of technical photography mainly includes VIS photography, UV photography, IR photography, UV fluorescence/luminescence photography and possibly VIS luminescence photography. The text also features traditional procedures of processing images in so called “false colours”.

Technical photography is introduced in a broader context of imaging techniques, including multispectral and hyperspectral imaging. Furthermore, the most commonly used types of technical photography, their principles and potential use in the conservation and preservation practice are described. The article presents “full-spectrum” conversion of the digital camera in theory and practice and the selection of suitable photographic equipment and optical filters.

Based on a literature search, basic photographic equipment was purchased, including the “full-spectrum” modified digital single-lens reflex (DSLR) camera Canon EOS 80D and photographic filters suitable for individual techniques of technical photography. The choice of filters had to take into consideration the original spectral sensitivity of the camera and the knowledge of the transmission curves of the filters that were subsequently verified by spectrophotometric measurements. Suitable procedures of experimental set-up, camera settings, image calibration and post-processing in graphics software will be the topic of a future article.