

Мультиспектральное дистанционное зондирование памятников древнерусской живописи, полихромной скульптуры и палеографии

Андреев А.В. Институт космических исследований РАН, Москва
Брегман Н.Г. Государственный институт реставрации, Москва
Говоров А.В., Институт космических исследований РАН, Москва
Жижин М.Н., Институт космических исследований РАН, Москва
Ильин В.А., Курчатовский институт, Москва
Пойда А.А., Курчатовский институт, Москва
Уханова Е.В., Государственный Исторический музей, Москва

Работа выполнена при поддержке грантов: РНФ 17-18-01399 «Ключевые памятники древности и средневековья из собрания Исторического музея: прочтение неисследованных явлений истории современными естественнонаучными методами» и РФФИ 17-29-04476 офи-м «Методы визуализации угасших текстов и другой графической информации в средневековых письменных памятниках (рукописях) с использованием электромагнитного излучения различных спектральных диапазонов и цифровых технологий обработки изображений».

Предпосылки возникновения проекта

Склейка макрофрагментов росписи Праотец Ной (оцифрованная аналоговая съемка вручную) Фотоархив

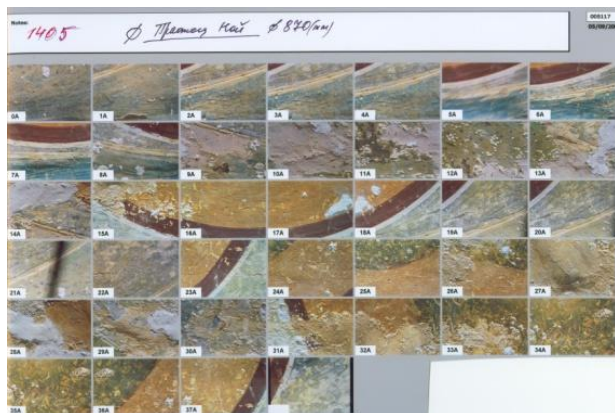
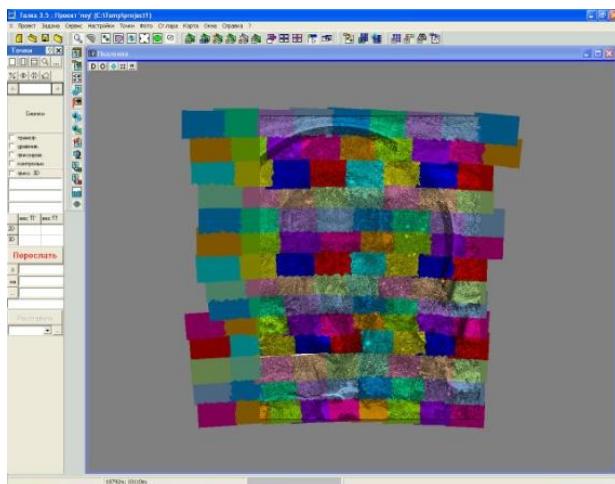


Схема сборки панорамы



артефакты склейки по причине недостаточного перекрытия

Визуализация : многодисплейные видеостены

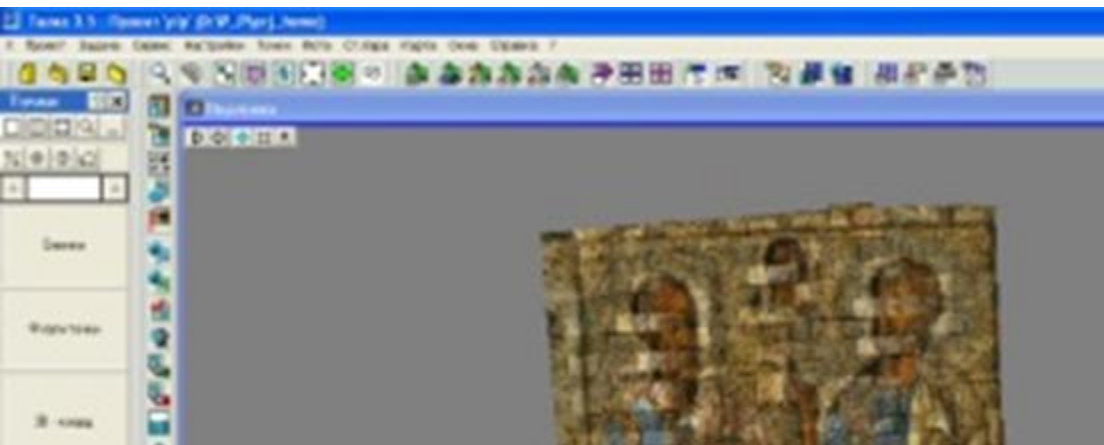
Первая в Москве видеостена из 4x3 мониторов и графический кластер из 7 узлов для визуализации гигапиксельных панорам и 4K видеопотоков в 1 Гбит сети ГЛОРИАД

Создана в ИКИ РАН в сентябре 2007 г. Использовала ПО SAGE версии 1



Петр и Павел

Цифровая ручная съемка в процессе реставрации
(2008 г.). Более 1000 макро фрагментов



Высокая трудоемкость
вследствие
применения ручного
труда

Вывод: необходимо
использовать
работизированную
платформу



**Панорамная съемка с помощью
роботизированных платформ
цветной текстуры, 3D формы и
микрорельефа поверхности**

Роботизированная платформа. Технический задел

Ферапонтово, 2009 г



Азимутальная платформа для съемки сферических поверхностей. Аналог камеры Google: не позволяет восстановления 3D объектов, так как ведет съемку из одной точки.

Ферапонтово, 2014 г

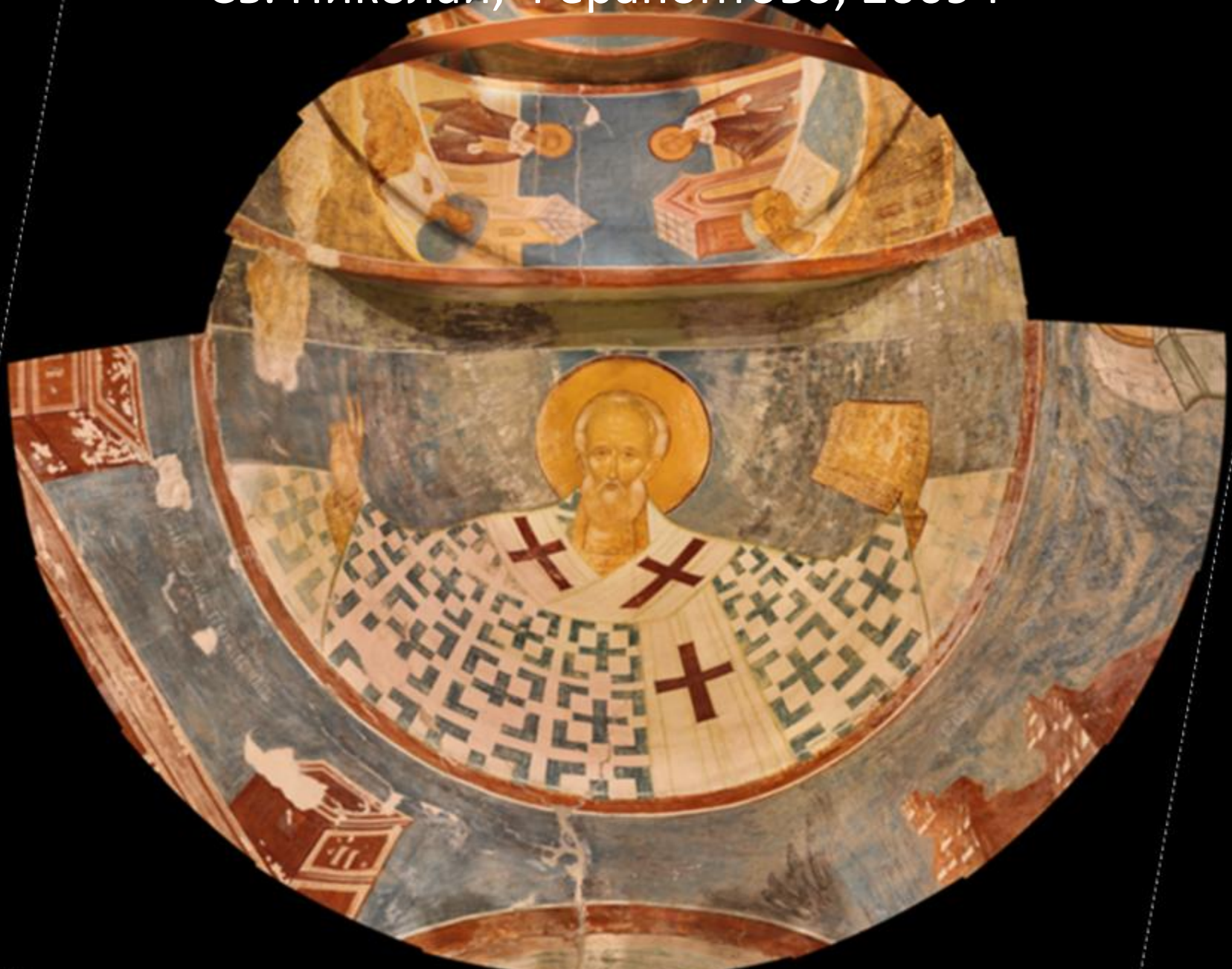


Планарная платформа для съемки мозаичных макрофрагментов. Платформа позволяет снимать в автоматическом режиме макрофрагменты общей площадью 1-2 м².

Роботизированная платформа - развитие

1. В настоящее время мы отрабатываем методы съемки поверхности площадью существенно превышающей размер рамы (1-2 м²)
2. Дополнить технику склейки изображения двумерных поверхностей, включающих небольшие деформации, такие как трещины и неровности штукатурки склейкой полноценных 3D объектов

Результат панорамной азимутальной съемки.
Св. Николай, Ферапонтово, 2009 г



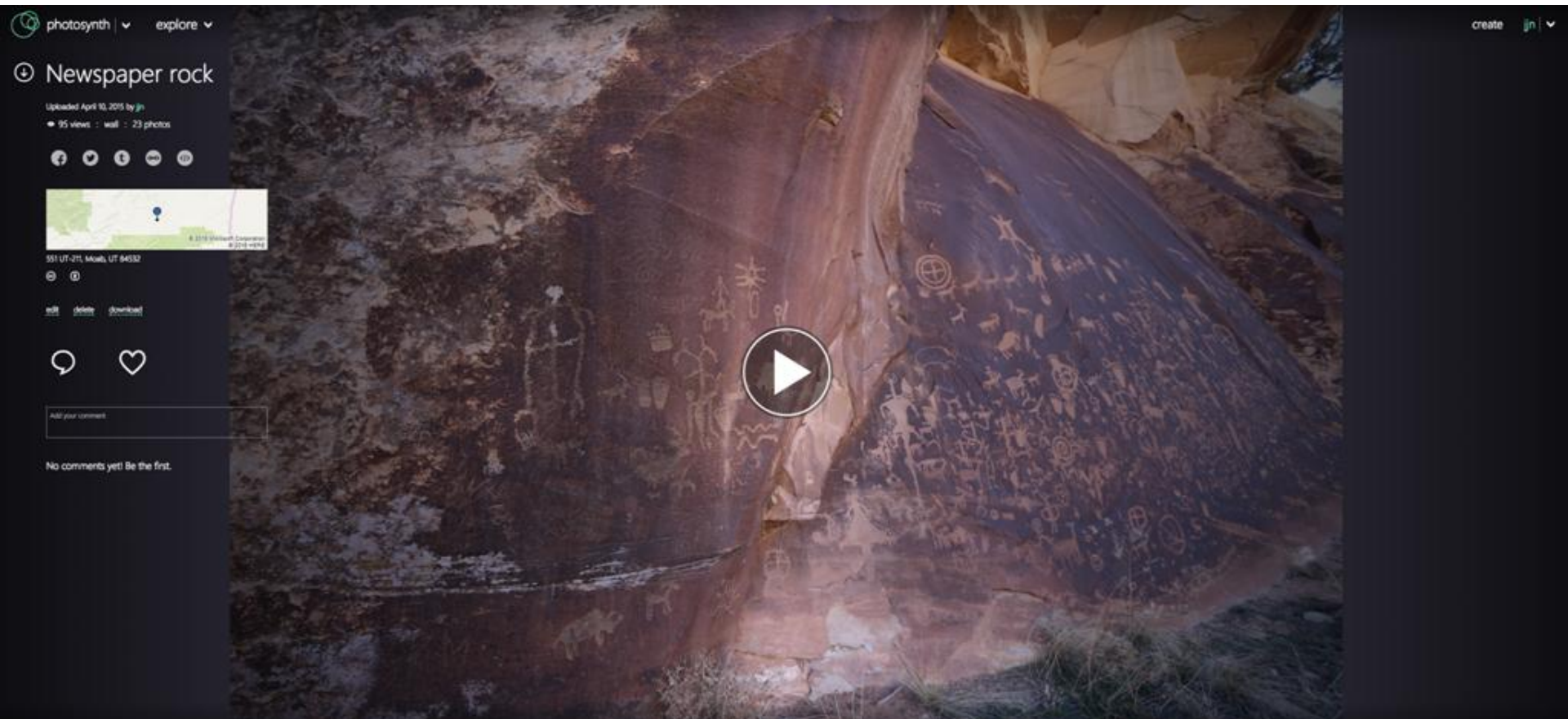
Реконструкция 3D формы

Существует два направления:

1. восстановление 3D модели из большого количества фотоизображений, сделанных под разным углом (SFM - Shape From Motion)
2. использование лазерных 3D сканеров или других 3D датчиков (например, Microsoft Kinect)

Петроглиф Newspaper в штате Юта (США)

Новая версия сервиса Photosynth 3D

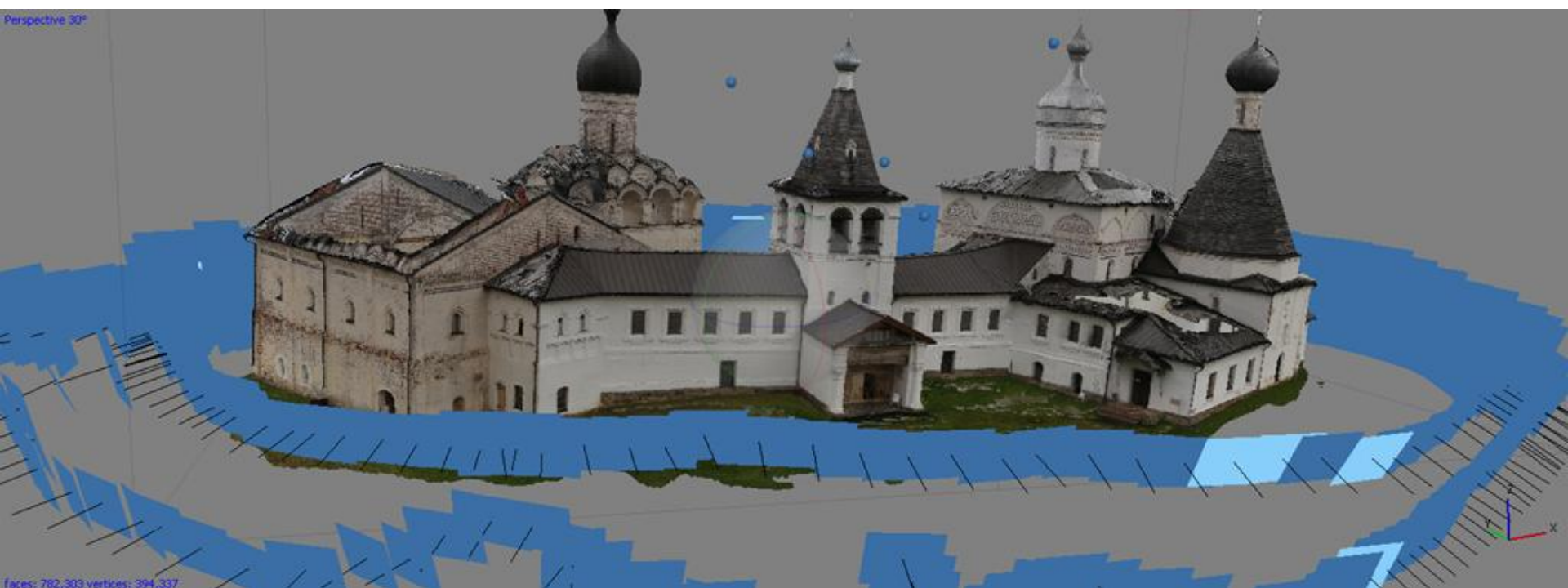


На каждой фотографии выделяются «ключевые» точки, не зависящие от поворота - сдвига - изменения масштаба

Попарное сравнение снимков позволяет найти общие ключевые точки, которые «выстраиваются» в неплотное 3D облако



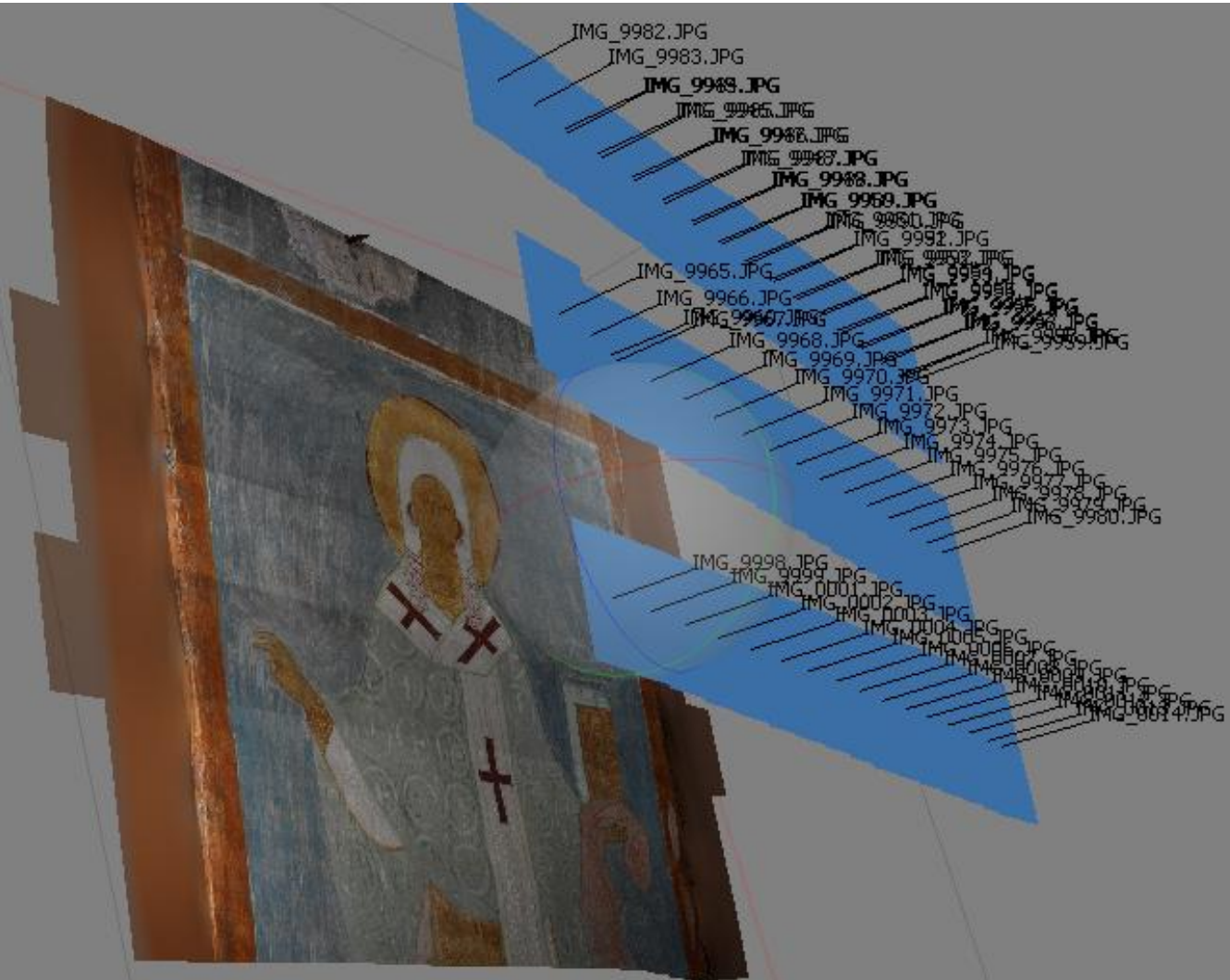
Фотограмметрическая реконструкция 3D плотное облако точек



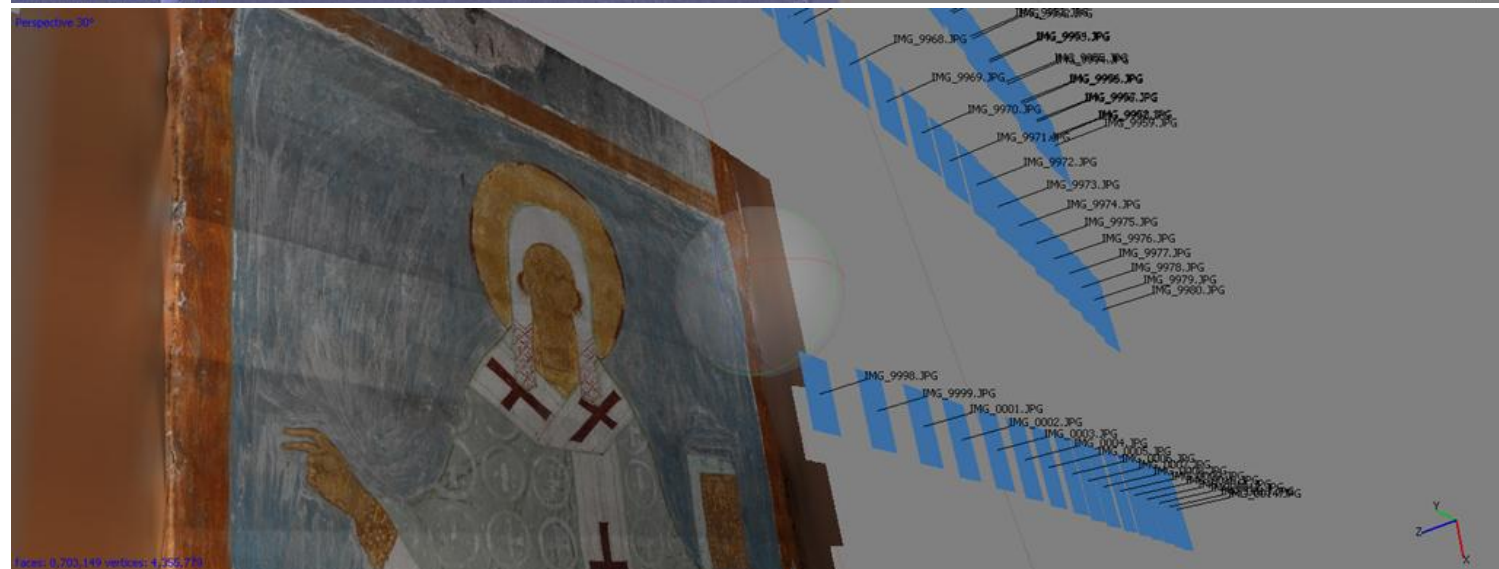
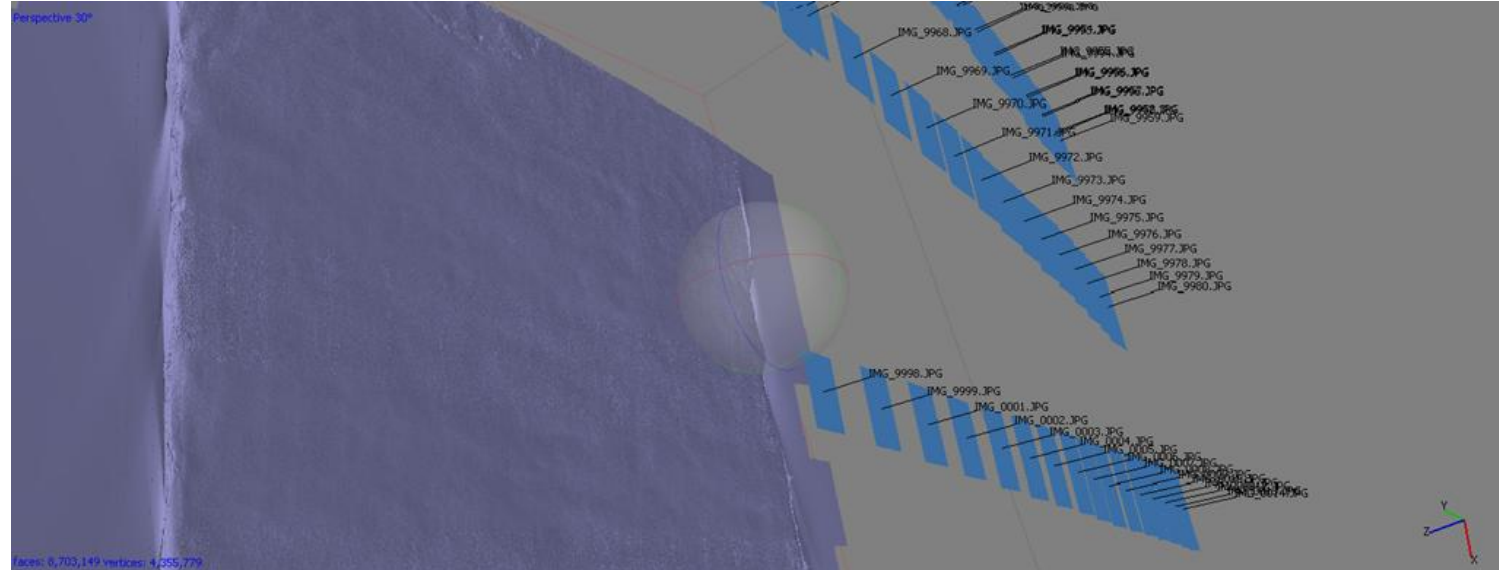
Метод вычислительной фотографии Shape From Motion (SFM) позволяет совместить в общую 3D модель набор фотографий, полученных при «обходе» объекта с разных точек, при условии что настройки камеры мало менялись. Результатом совмещения является плотное облако раскрашенных точек или трехмерная полигональная модель

Бюджетная альтернатива лазерному сканированию

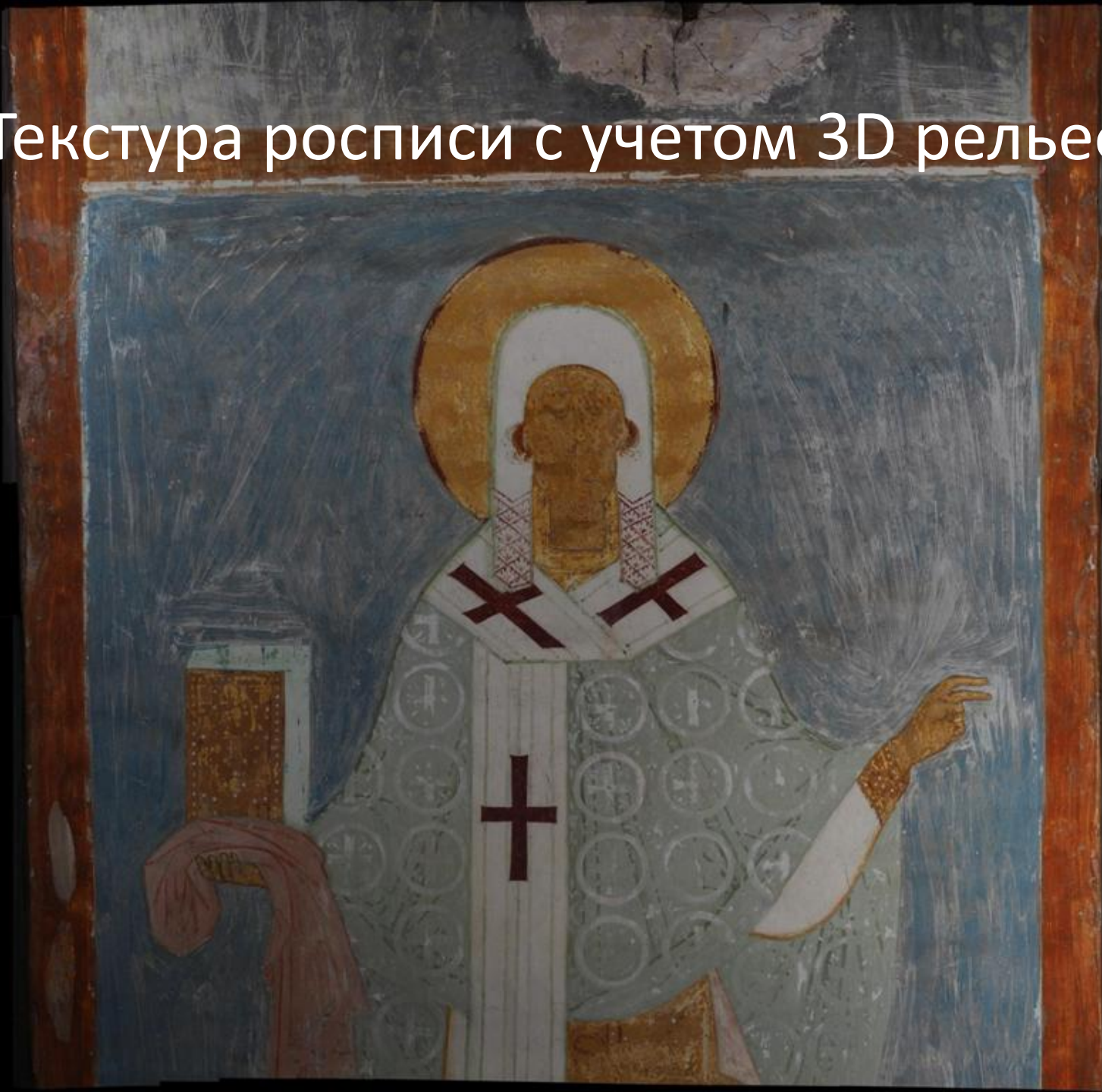
3D реконструкция из планарной панорамы стенной росписи



Цифровая модель рельефа и облако точек + цвет



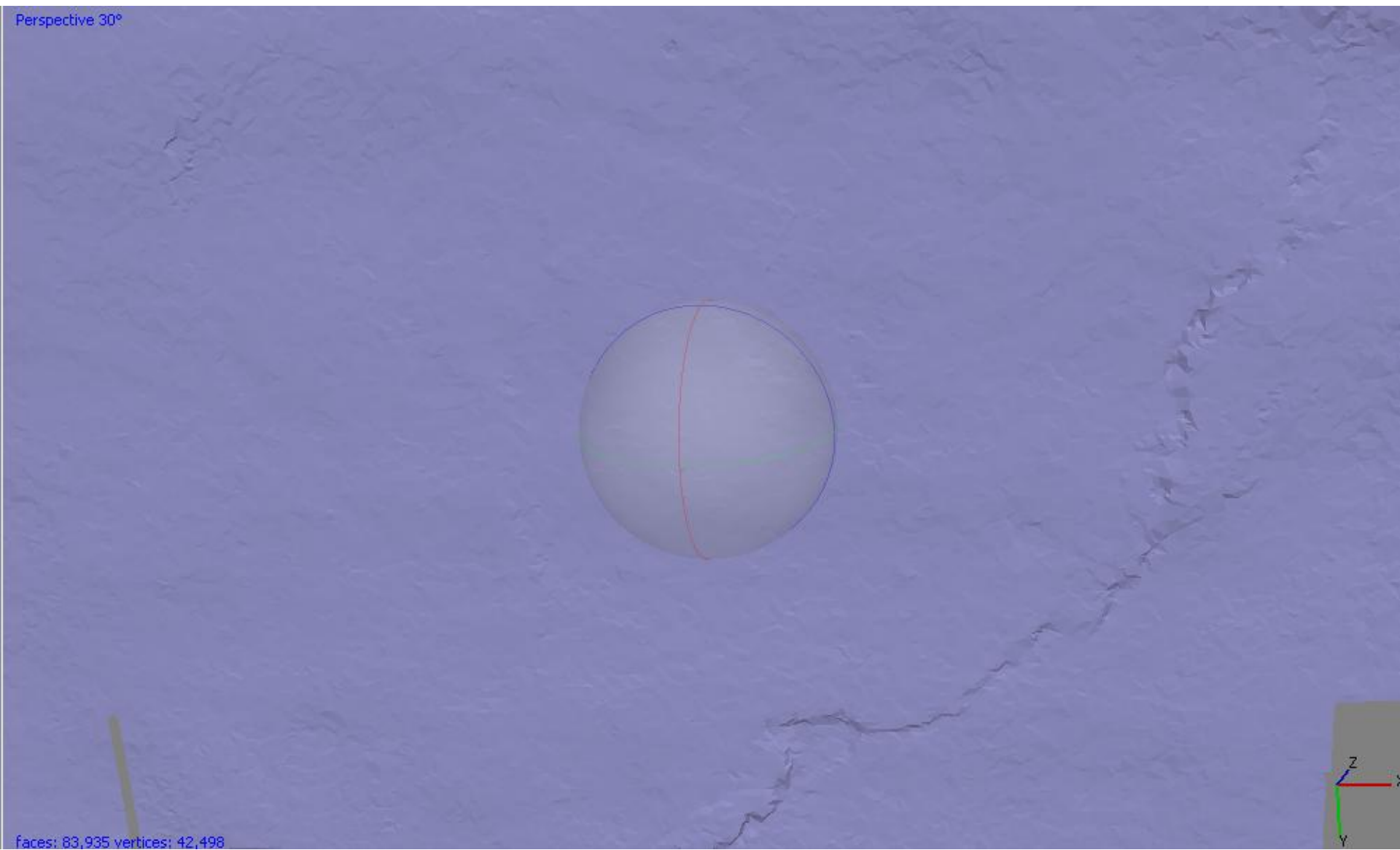
Текстура росписи с учетом 3D рельефа



Фрагмент текстуры – 5ый Вселенский собор



Цифровой рельеф – 5ый Вселенский собор



Фотография поверхности в боковом свете (raking light - RAK)

Цветные и ИК фотографии
настенной росписи в боковом свете
позволяют визуализировать
неровности, оценить сохранность
(трещины) и технику письма
(набросок)

Левая колонка – цветная фотография
и ее макрофрагмент в видимом
свете



Правая колонка – фотографии тех же
участков в боковом ИК

С помощью цифровой обработки
можно синтезировать изображение
с подсветкой под другим углом
(Reflectance Transformation Imaging –
RTI) или создать цифровую модель
рельефа (Shape from Shading)



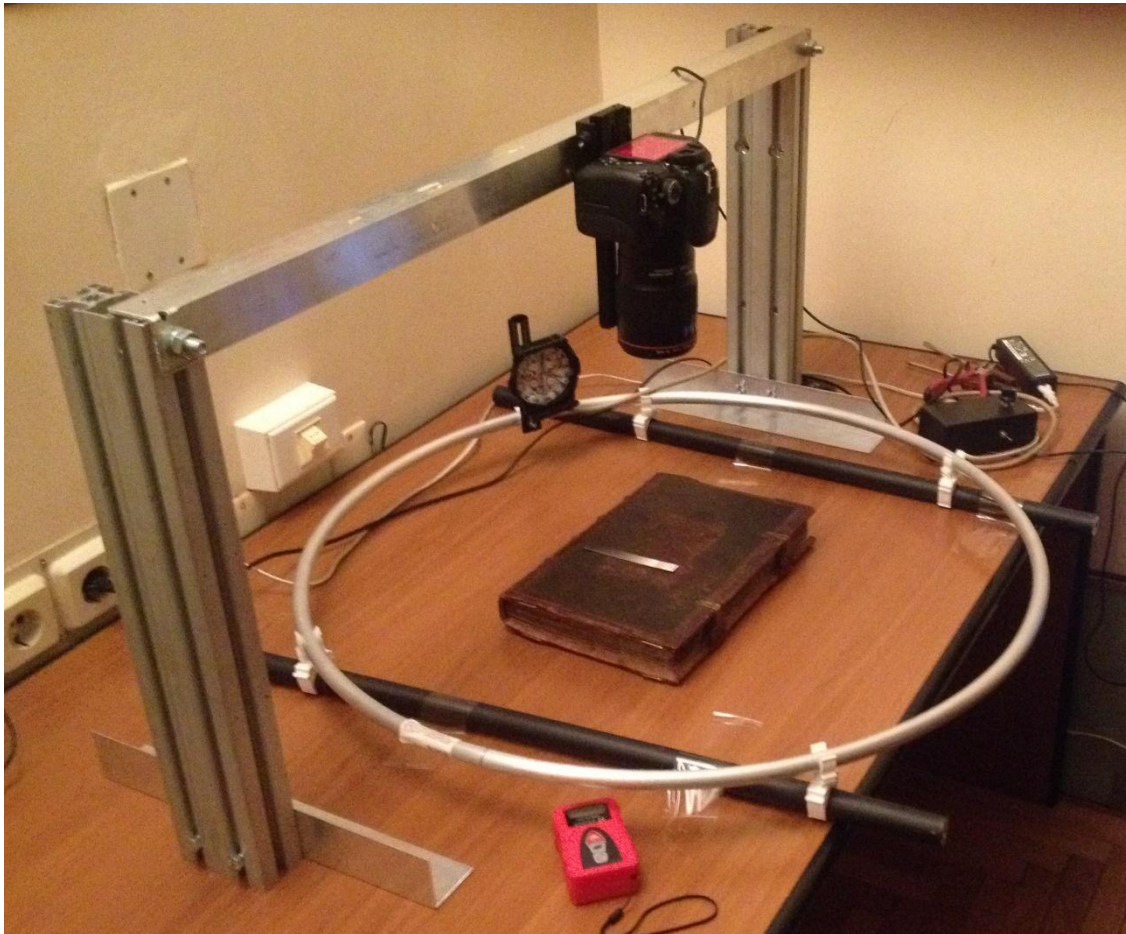
Фотография в боковом свете росписи Дионисия
Ферапонтово. 2014 г



Геометрия

Макет установки для
исследования микротопографии

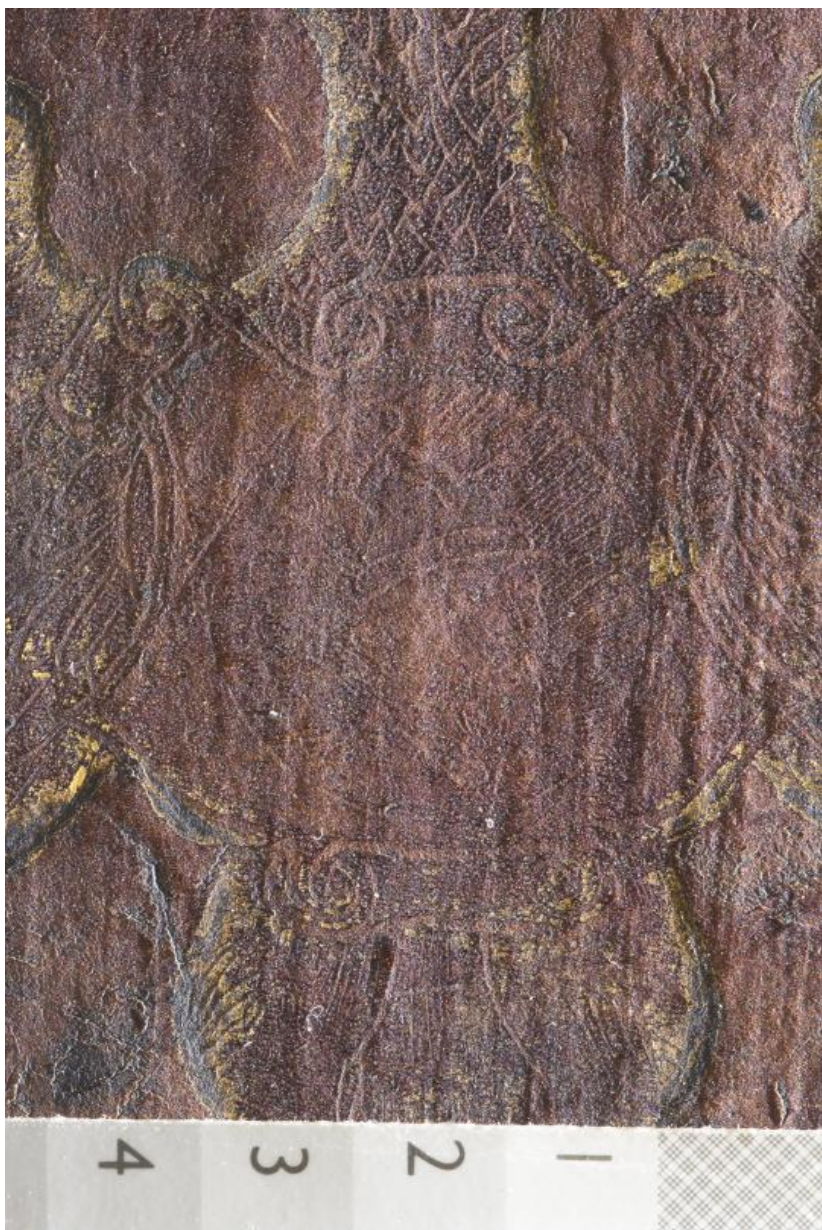
Набор светодиодов
от 365нм до 940нм



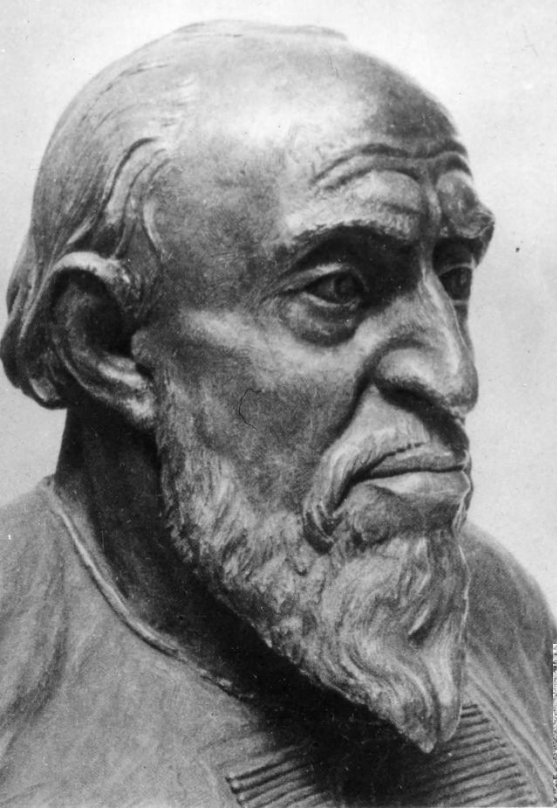


Подносной экземпляр Апостола 1564 г.
царю Ивану Грозному.
(ГИМ, ОР Цар.А 15).

Верхняя крышка переплета
с прижизненным портретом
Ивана Грозного, вытесненным на груди
у двуглавого орла, и его титулом.
Общий вид.



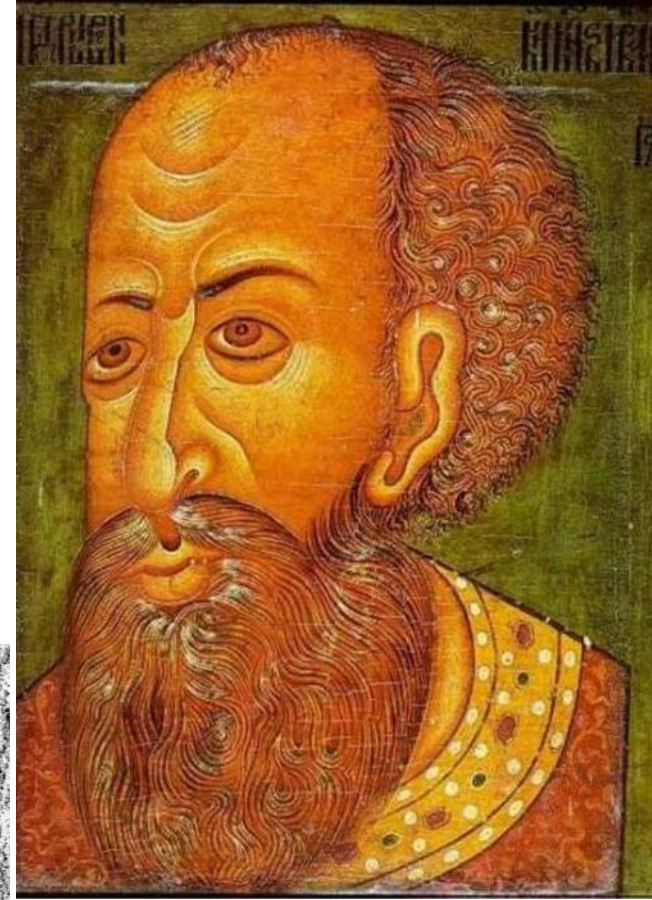
Исследование
микротопографии тиснения
на кожаном переплете
подносного царского
экземпляра первопечатного
Апостола 1564 г. при помощи
мультиспектральной
фотосъемки: цифровая
фотография верхней крышки
переплета при дневном свете
(общий вид);



4) черно-белое
изображение, полученное
методом компьютерной
обработки цифровой
фотографии средника
переплета в
инфракрасном диапазоне
(длина волны 730 нм),



М.М. Герасимов.
Реконструкция
портрета царя
Ивана Грозного.



Портрет (парсуна) царя
Ивана Грозного. 2-я
четверть XVII в. или
конец XIX – начало XX в.
Национальный музей
Дании, Копенгаген.

Чем отличается мультиспектральная фотография от цветной ?

	Мультиспектральная	Цветная
Диапазон длин волн	ближний УФ 300-400 нм, видимый 400-750 нм, ближний ИК 750-1000 нм	видимый 400-750 нм
Число спектральных окон	~ 10	3 (R - G – B)
Ширина спектрального окна	50 нм	>100 нм
Назначение	восстановление «угасших» изображений, спектральные свойства материалов отражающей поверхности образца, фотолюминесценция	точная передача цвета, как его видит глаз человека

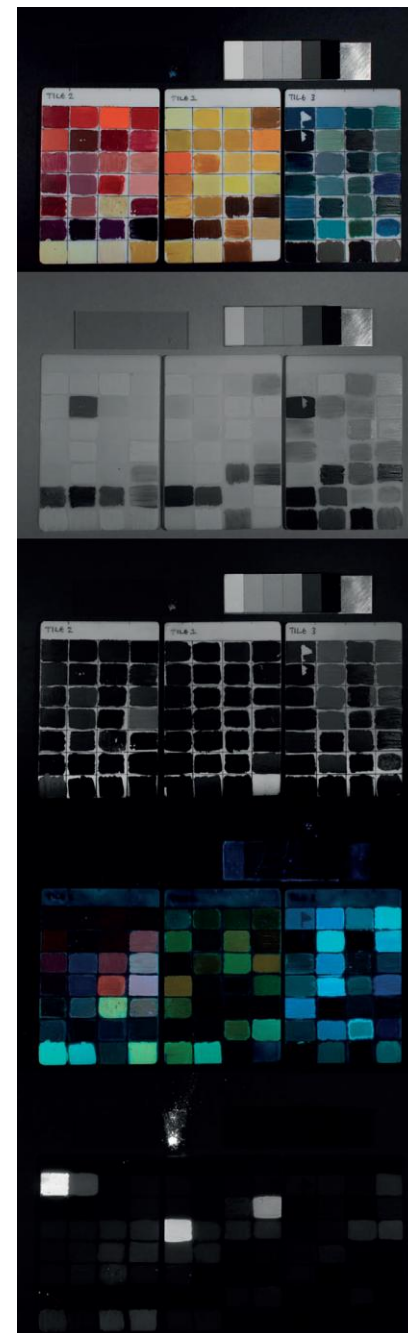
Два метода мультиспектральной фотографии

1. Широкополосный (галогеновый) источник освещения + набор узкополосных фильтров перед объективом камеры
2. Набор узкополосных источников освещения (светодиоды) + широкополосный фильтр перед объективом (не обязателен)

Метопы Парфенона

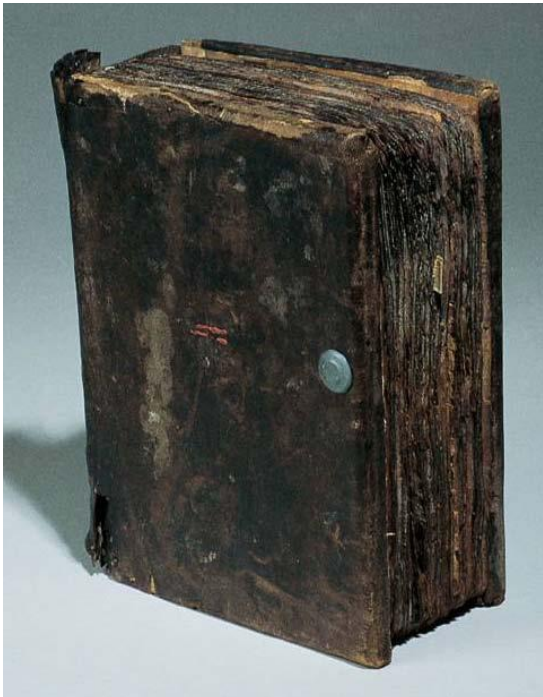
Прямое доказательство раскраски

- Получено в 2009 г. в Британском музее путем анализа инфракрасной флюоресценции красителей на поверхности скульптуры
- Использовалась цифровая зеркальная камера Canon, у которой был удален инфракрасный фильтр перед фотосенсором
- Ряд красителей, производившихся в Древнем Египте и Китае, дают заметную ИК флюоресценцию при освещении их видимым светом (использовались белые сверхъяркие фотодиоды)



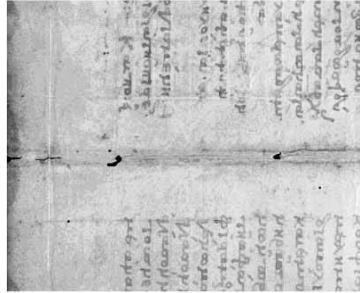
Палимпсест Архимеда

прочтение Rochester Institute of Technology, 2003-2010



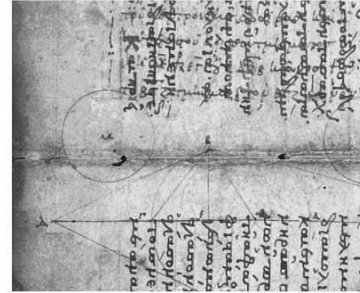
Палимпсест, фото с аукциона 1998 г

(a)



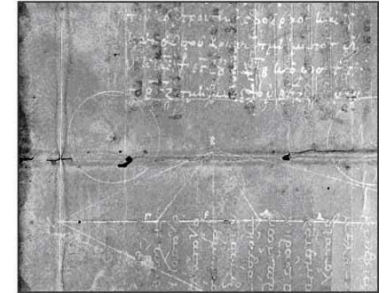
Видимый свет

(b)



Ультрафиолет

(c)



Результат вычитания

Первоначальный текст трактатов
Архимеда в средние века был затерт
и поверх него в перпендикулярном
направлении был написан вторичный
текст христианского содержания



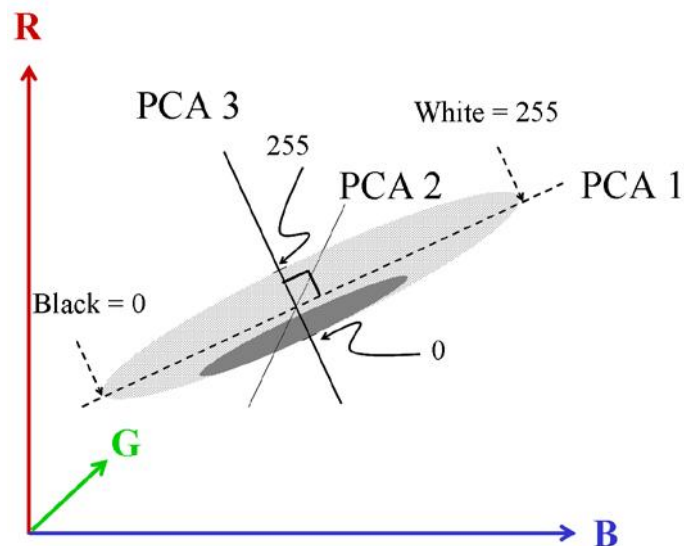
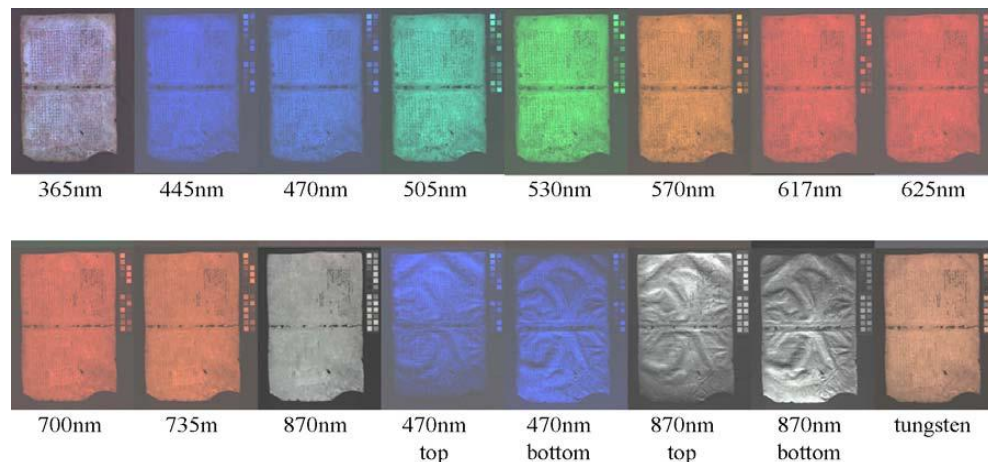
Совмещение в псевдоцвете угасшего
(красный) и вторичного (сине-зеленый) текстов

Палимпсест Архимеда

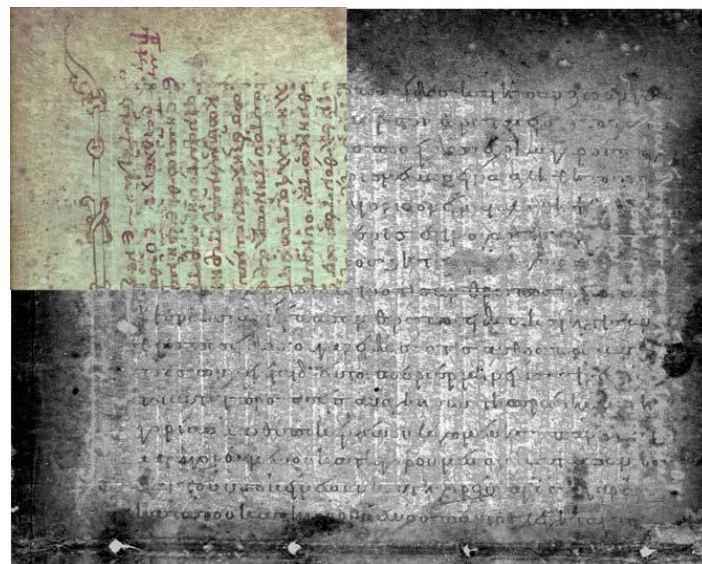
вторая версия методики



Светодиодная мультиспектральная установка EurekaVision



Главные компоненты в RGB изображении ультрафиолетовой флуоресценции

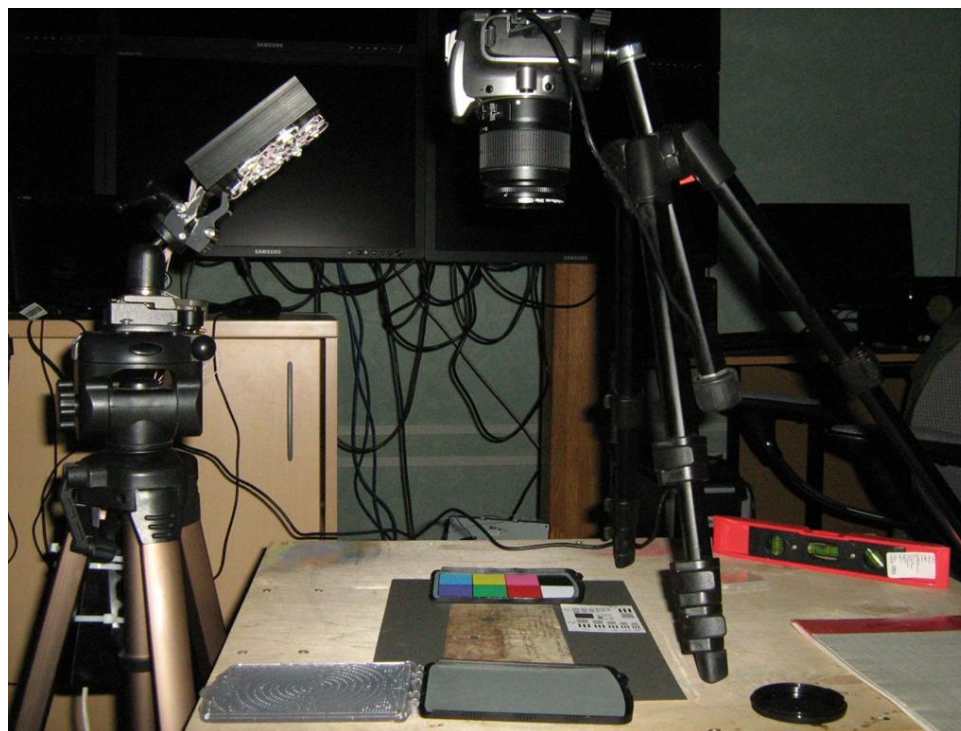


Заметное улучшение читаемости угасшего текста

Мультиспектральная съемка и флюорисценция.

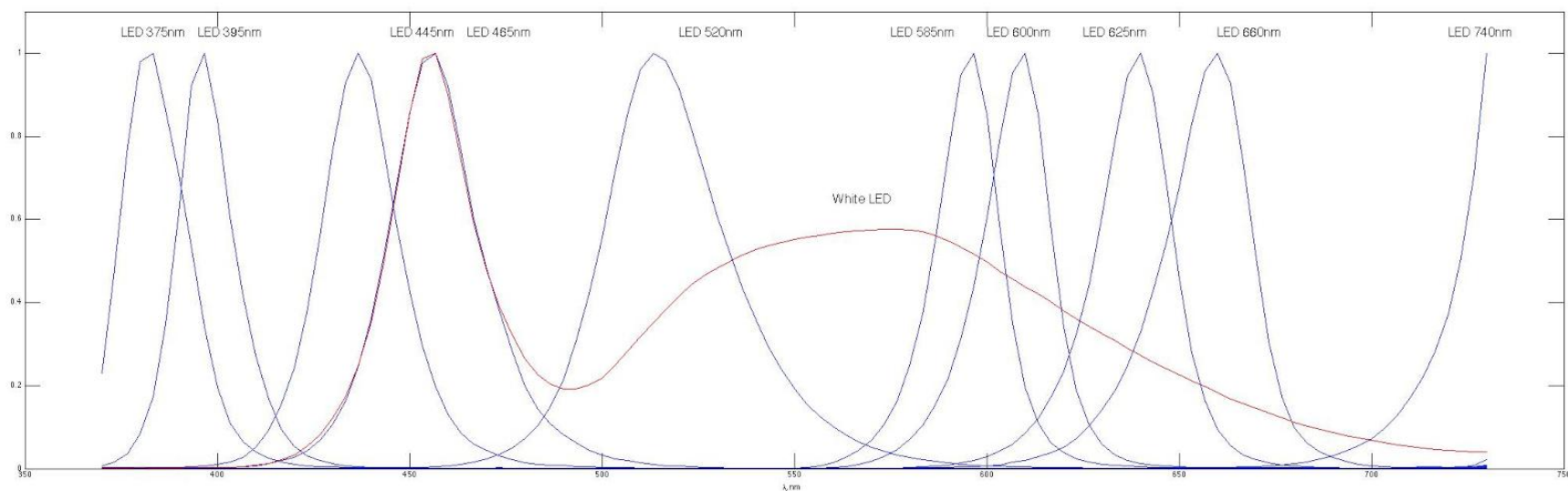
Технический задел

В проекте мы будем использовать подход, основанный на узкополосных сверх-ярких светодиодах



Установка для мультиспектральной научной съемки светодиодами в разных спектрах от 375 нм. (ультрафиолет) до 860 нм. (инфракрасный спектр) с шагом 40 нм

Спектры отдельных светодиодов в узкополосном осветителе



Восстановление угасших изображений в ИК лучах

Византийская икона
из частной коллекции

Фотографии в
видимом свете



Фотография в ИК



Совмещение деталей в видимом и инфракрасном спектрах

Высокие частоты – из
видимого спектра

Низкие частоты – ИК
диапазон

Полученное методами
вычислительной
фотографии изображение
позволило
реконструировать
«первоначальный» вид
створок с угасшей со
временем надписью

ГосНИИР, 2009 г



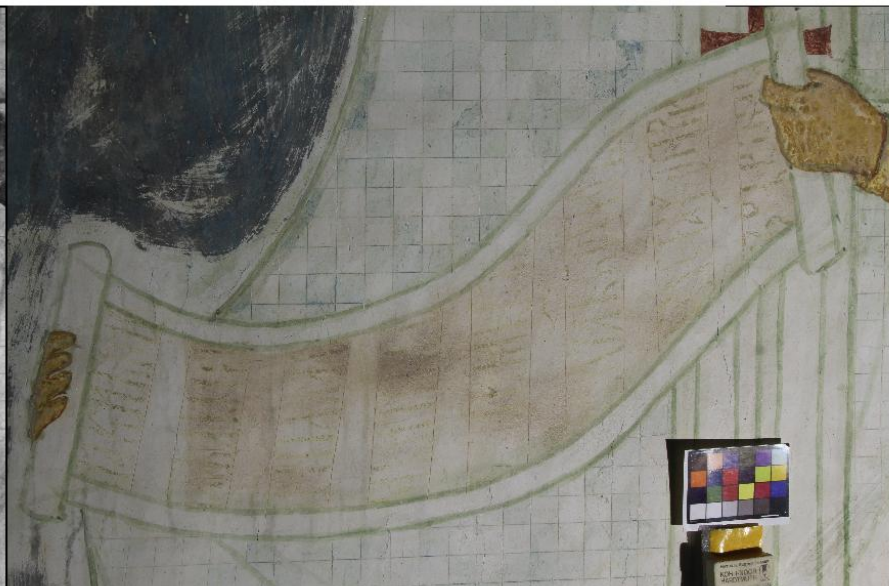
Икона св. Василия
круга Дионисия
в видимом и
ИК свете
Ферапонтово, 2014 г



Позем виден в
видимом свете, но
прозрачен в ИК



Угасшие свитки, Ферапонтово 2016



Математика CVA

Задача канонического дисперсионного анализа состоит в том, чтобы “разнести” оставшиеся пиксели мультиспектрального изображения по 2-3 классам, максимально используя информацию о спектральных свойствах известных пикселей.

В пространстве спектральных признаков пикселей делается линейное преобразование координат (растяжение и поворот) так, чтобы средние значения спектров для известных пикселей из трех классов (новый текст - угасший текст - фон) были максимально удалены вдоль новых координатных осей.

ON SOME CONTRADICTIONS IN GENERAL TAXONOMY AND EVOLUTION¹

ALEXANDER A. LUBISCHEW

Krasnoarmejskaja str. 2, kw. 4, Uljanovsk, U.S.S.R.

Received October 1, 1962

Syst. Zool., 30(3), 1981, pp. 268–280

THE GEOMETRY OF CANONICAL VARIATE ANALYSIS

N. A. CAMPBELL AND WILLIAM R. ATCHLEY

Abstract

*Campbell, N. A. (Division of Mathematics and Statistics, CSIRO, Wembley 6014, Western Australia) and W. R. Atchley (Department of Entomology, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706) 1981. The geometry of canonical variate analysis. Syst. Zool., 30:268–280.—*The geometry of canonical variate analysis is described as a two-stage orthogonal rotation. The first stage involves a principal component analysis of the original variables. The second stage involves a principal component analysis of the group means for the orthonormal variables from the first-stage eigenanalysis. The geometry of principal component analysis is also outlined. Algebraic aspects of canonical variate analysis are discussed and these are related to the geometrical description. Some practical implications of the geometrical approach for stability of the canonical vectors and variable selection are presented. [Multivariate analysis; canonical variate analysis; discriminant analysis; principal component analysis.]

Principal Component Analysis (PCA)

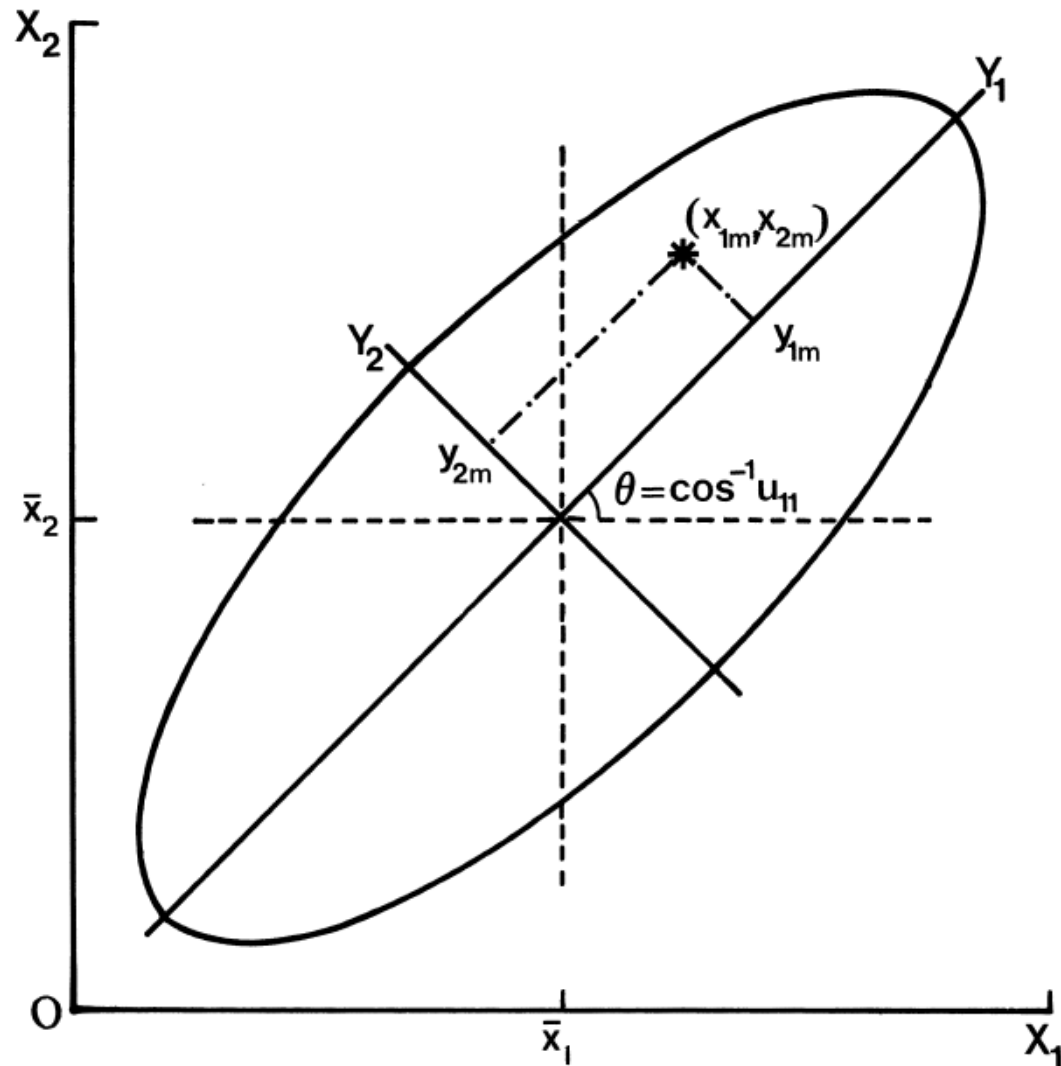
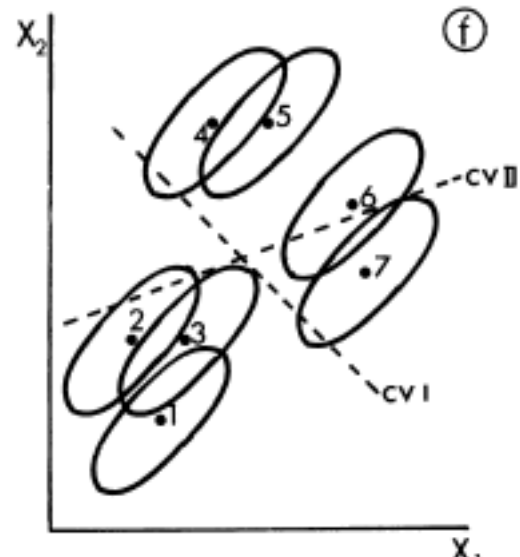
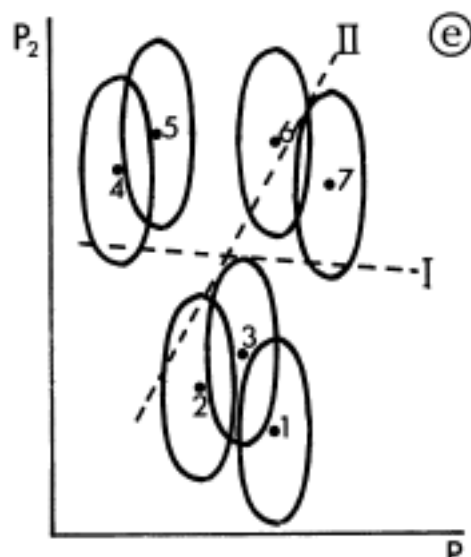
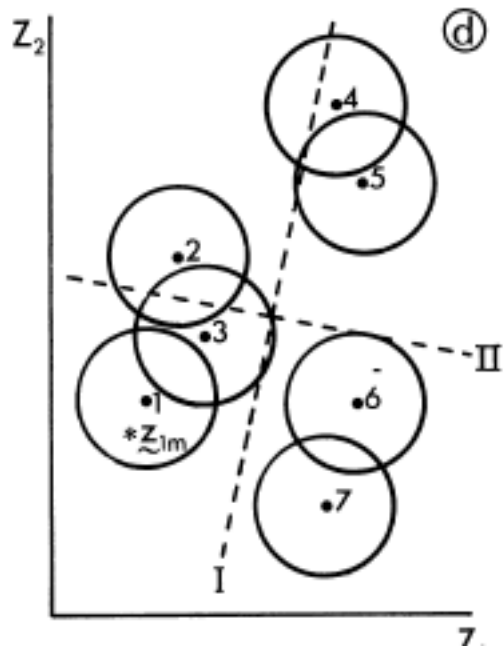
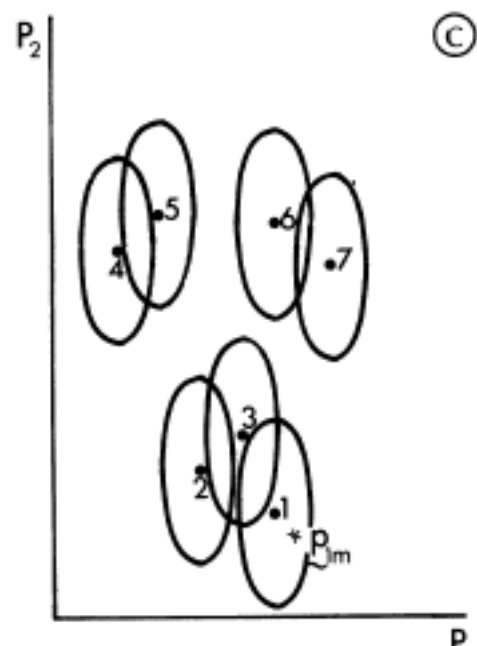
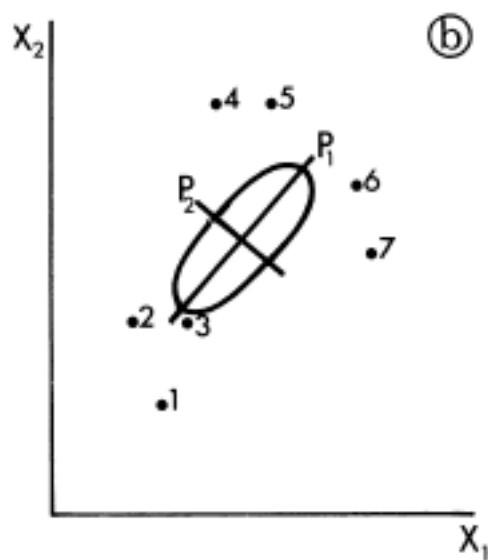
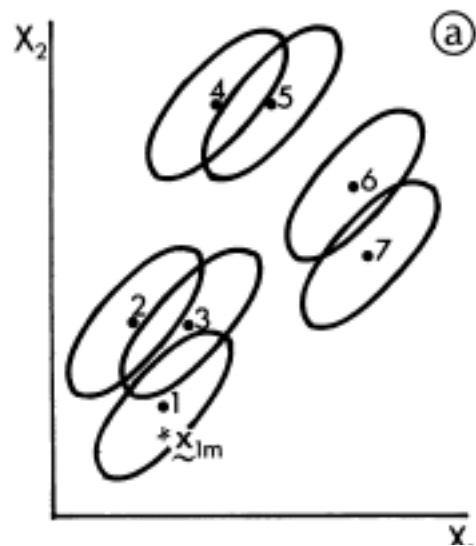
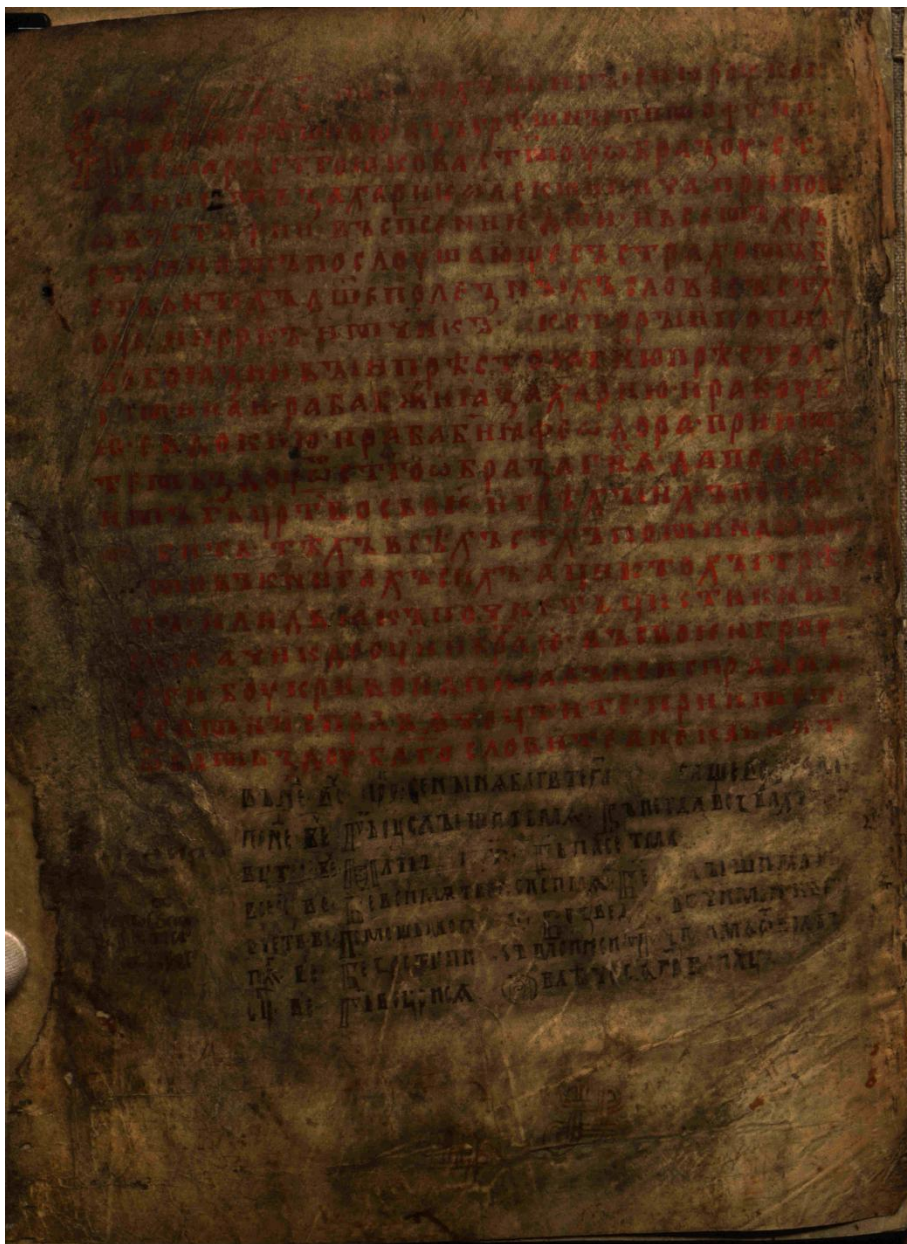


FIG. 1.—Idealized representation of scatter diagram for two variables, showing the mean for each variable (\bar{x}_1 and \bar{x}_2), 95% concentration ellipse, and principal axes Y_1 and Y_2 . The points y_{1m} and y_{2m} give the principal component scores for the observation $\mathbf{x}_1 = (x_{1m}, x_{2m})^T$. The cosine of the angle θ between Y_1 and X_1 gives the first component u_{11} of the eigenvector corresponding to Y_1 .

Canonical Variate Analysis



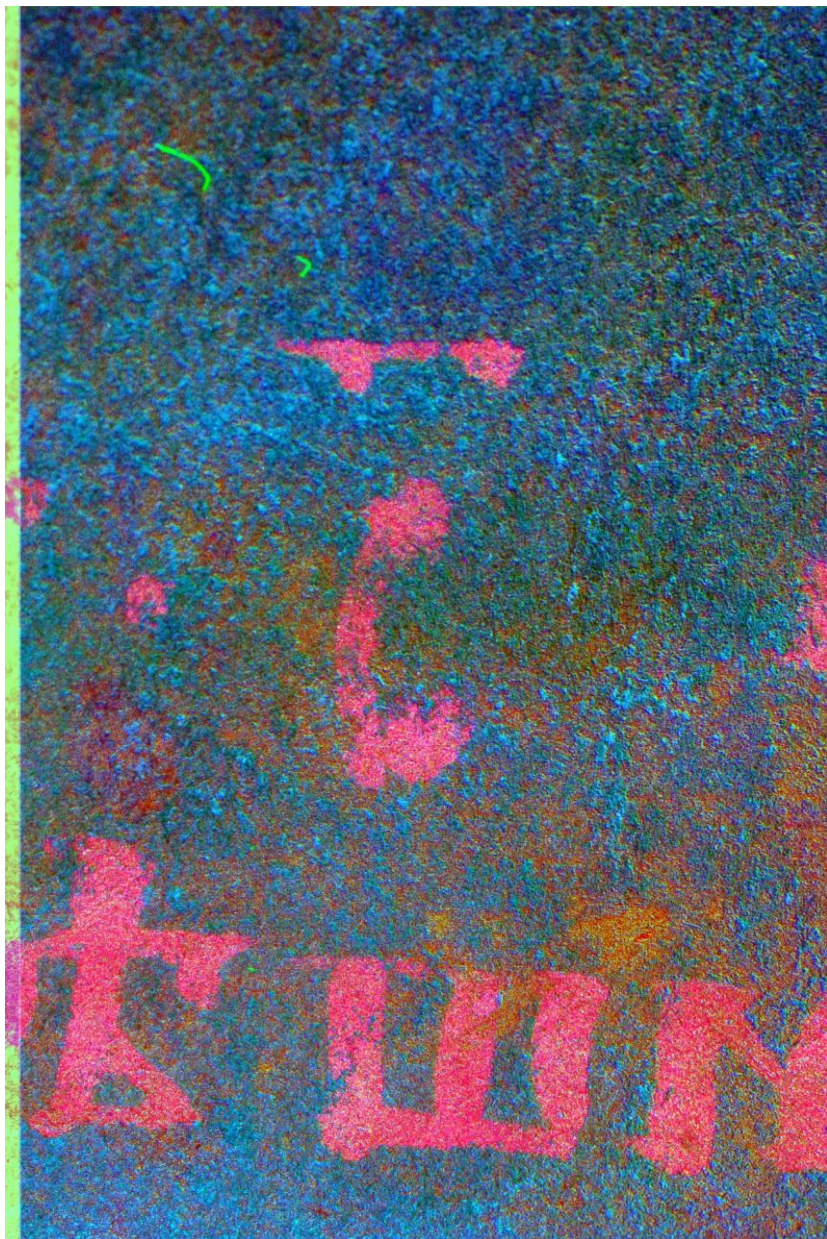


Лобковский Пролог 1262 или 1282 гг.
(ГИМ, ОР Хлуд. 187).

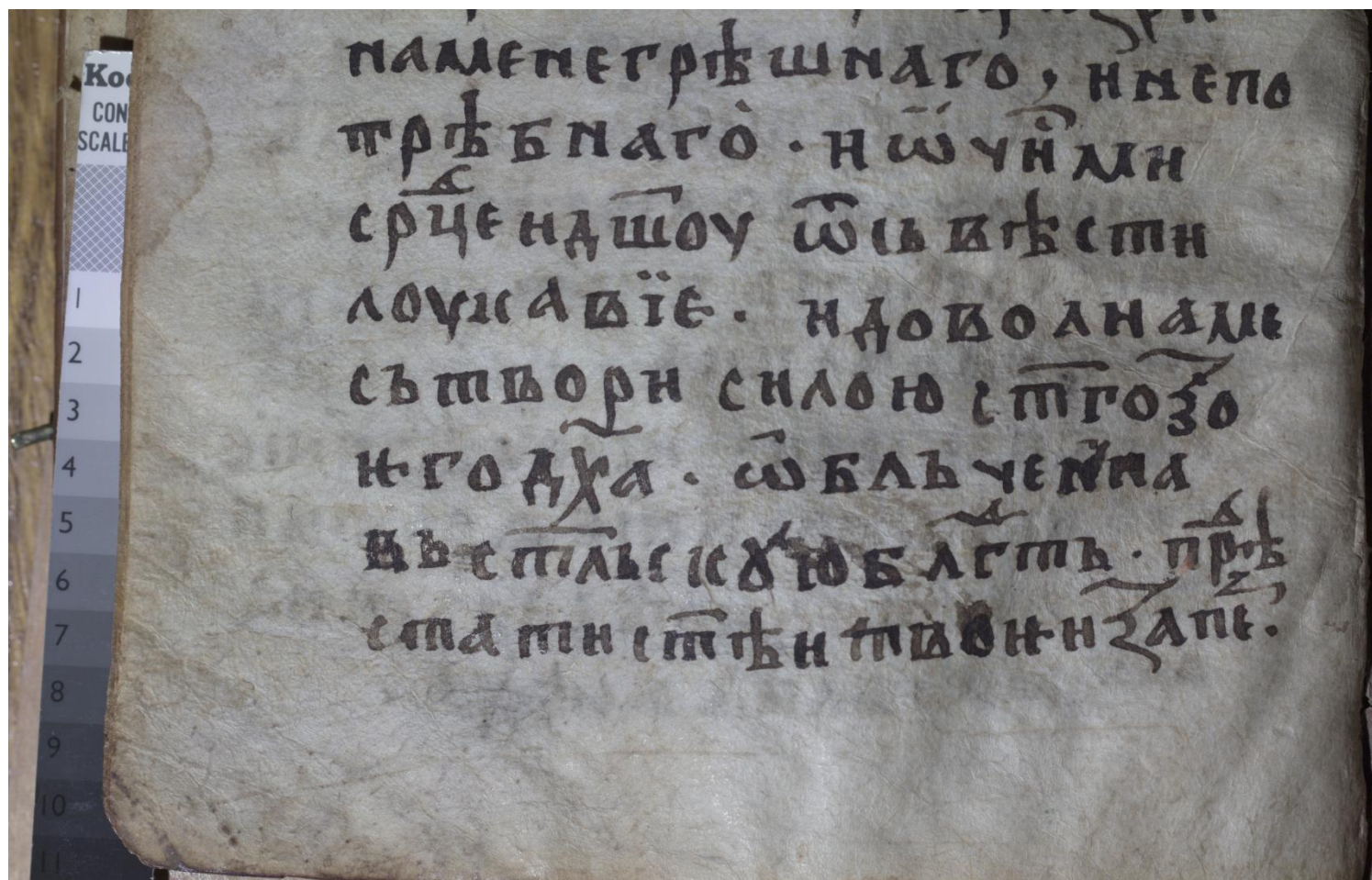
Л. 148 об. – запись писца Тимофея, пономаря церкви св. Иакова, о написании этой книги по заказу Захария Олекшинича для церкви св. Образа Господня при попе Евстафии, с просьбой помиловать заказчика и рабов божьих Евдокию и Федора (вероятно, жену и сына), с благопожеланием заказчику и просьбой исправлять, благословить и не клясть писца, «аще где в своей грубости криво написал».

Съемка в видимом (белом) свете

Видимый+УФ+Зеленый+Красный

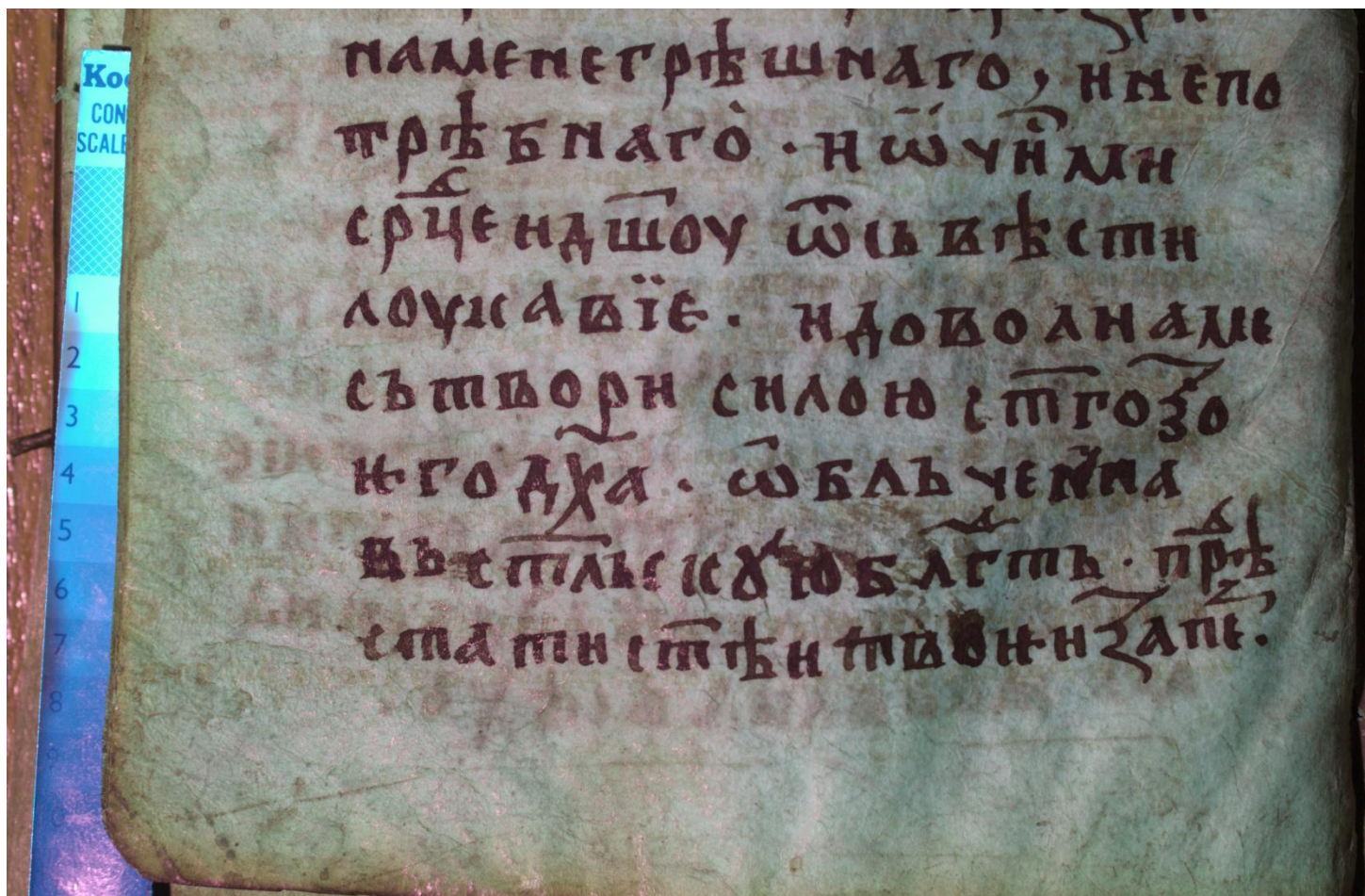


При помощи метода мультиспектральной макросъемки с фотографированием с высоким разрешением и последующей математической обработкой пиксельных изображений, было получено объективное подтверждение того, что третья буква в дате является копой, написанная писцом в виде традиционного «с» с небольшим хвостом, отходящим под строку, правой дуги, входящей в состав «о» в этом знаке нет. Таким образом, дискуссия по трактовке этой записи может быть окончена: рукопись написана в 6790-м году «от сотворения мира», т.е. 1282 г.



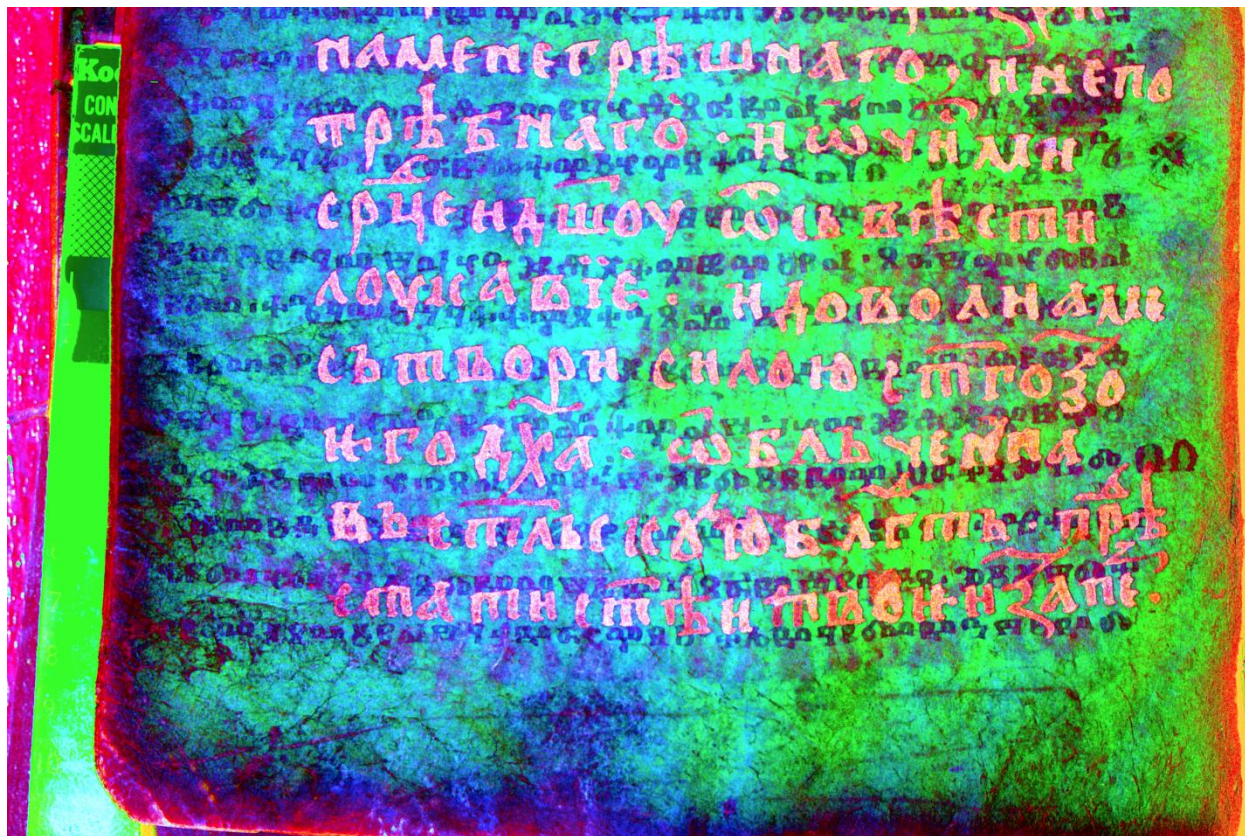
Хлудовский палимпсест (ГИМ, ОР Хлуд. 117).

Нижняя половина л. 12 об. в видимом (белом) свете.



Хлудовский палимпсест (ГИМ, ОР Хлуд. 117).

Нижняя половина л. 12 об. в ультрафиолетовом диапазоне (365 нм).



Худовский палимпсест
(ГИМ, ОР Хлуд. 117)

Визуализация
нижней части л. 12 об.



и увеличенный фрагмент.

Заключение

Таковы первые результаты применения естественнонаучных методов визуализации угасших изображений, полученные при работе с пергаменными листами рукописей и тисненой кожей переплетов, хранящихся в фондах ГИМ.

Успешные наработки

ГИМ, РосНИИР, Кирилло-Белозерский музей, ОАО «НЕДРА»

Перспективы

Цифровые технологии,

поточная обработка,

роботизированные установки