

Приведение спутниковых изображений в географическую проекцию с автоматическим выбором оптимального метода аппроксимации по локальному коэффициенту сжатия

Непомнящий П.В., Юрин Д.В.

ЦОС и ВТ МФТИ

Москва, Россия

Аннотация

Предлагается алгоритм, переводящий спутниковое изображение в географическую проекцию с одновременной коррекцией аппаратных геометрических искажений. Проведено исследование методов аппроксимации. Осуществляется автоматический выбор способа аппроксимации в зависимости от локального коэффициента сжатия. Обращения к баллистическому модулю вычисления географических координат строго последовательны по времени съемки строки и без повторов.

Ключевые слова: преобразование изображений, географические проекции, геоинформационные системы, спутники.

1. ВВЕДЕНИЕ

Преобразование изображения с одной сетки растра на другую используется во многих задачах по обработке изображений. Среди этих задач есть такие как исправление апертурных искажений камеры, перевод изображений со спутника в одну из стандартных географических проекций, проецирование изображений на поверхности различной формы при восстановлении трехмерных сцен [8,9], разномасштабная сегментация [5,7], поиск изображений по базам данных [6], совмещение снимков, полученных с разных положений и под разными углами с приведением их к одному масштабу. В данной работе разрабатывался универсальный алгоритм преобразования изображений, осуществляющий автоматический выбор оптимального для данного участка изображения способа аппроксимации и позволяющий выполнить произвольное преобразование за один этап. Этот алгоритм был испытан на задаче приведения аэрокосмических изображений в географическую проекцию.

Характерной особенностью изображений земной поверхности, полученных со спутника, является наличие значительных искажений, связанных со сферичностью земли и геометрией съемочной аппаратуры. Существует стандарты для представления карт и аэрокосмических снимков – географические проекции, в которые требуется их переводить [1].

Для проецирования задается преобразование, которое переводит географические координаты точки в систему координат соответствующей проекции. Географические координаты можно вычислить несколькими способами, например исходя из баллистических данных [2]. Преобразование применимо только для непрерывного изображения (когда интенсивность есть непрерывная функция от координат), но в качестве исходного в задаче

используется дискретное (растровое) изображение, в котором интенсивность задана только для отдельных точек, пикселей, причем при переводе в географическую проекцию исходная и результирующая сетки растра в общем случае смещены и деформированы друг относительно друга. Отсюда возникает необходимость аппроксимации яркости точки нового изображения по значениям пикселей попавших при проецировании в некоторую окрестность этой точки. Это неизбежно приводит к потере информации при любом преобразовании растрового изображения [3,4]. При этом требуется обеспечить максимально возможное сохранение точности данных, алгоритм должен осуществлять одновременно все необходимые преобразования и использовать наилучший способ аппроксимации, который, более того, может изменяться в пределах одного изображения. Еще одной специфической особенностью преобразования спутниковых изображений является то, что часто координаты пикселей вычисляются по баллистическим данным. Многие алгоритмы баллистических расчетов могут считать только вперед во времени, а сохранение координат всех пикселей в памяти представляется нежелательным ввиду больших размеров снимков.

2. ЗАДАЧА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАСТРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Пусть задано некоторое преобразование координат вида:

$$\begin{aligned}x' &= \varphi(x, y) \\ y' &= \psi(x, y)\end{aligned}$$

Оно переводит точку (x, y) из исходной системы координат в результирующую, в которой эта точка имеет координаты (x', y') .

Преобразование может включать в себя повороты, растяжения или сжатия, формулы проекции изображения на трехмерную поверхность, в случае с географической проекцией – формулы перевода эллипсоида в плоскость, оно также может быть комбинацией всех этих преобразований. Когда преобразование является переводом географических координат в проекцию, роль x и y играют долгота и широта, а x' и y' – координаты в системе координат конкретной проекции.

Из-за того, что преобразование происходит из дискретного изображения в дискретное, невозможно осуществить такое преобразование без потерь если растровые сетки изображений не совпадают (такие случаи, как правило не представляют интереса). Для аппроксимации пикселей

итогового изображения используется несколько методов, эффективность которых зависит от коэффициента сжатия и необходимо выбрать из них наиболее оптимальные.

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ГРАНИЦ СПРОЕЦИРОВАННОЙ ОБЛАСТИ

Вначале алгоритм определяет границы области в результирующей системе координат, куда попадает после преобразования исходное изображение. Это делается для того, чтобы впоследствии обрабатывались только пиксели, находящиеся в этой области – в результате уменьшается количество необходимых вычислений и ускоряется работа алгоритма за счет того, что не тратится время на точки, куда заведомо не попадают после преобразования пиксели исходного изображения.

Все краевые точки исходного изображения преобразовываются к новой системе координат, в результате чего, при последовательном соединении этих точек прямыми, получается многоугольник, описывающий ту область, куда ляжет после проецирования исходное изображение (рис.1).

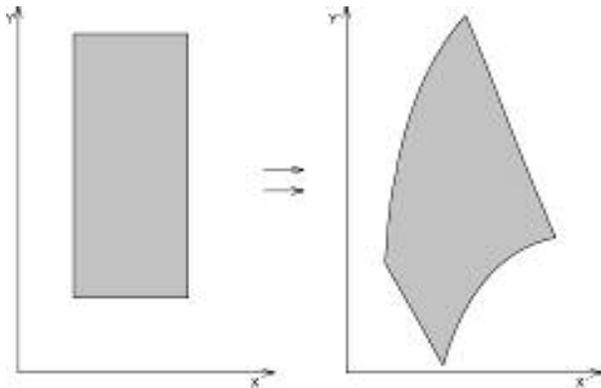


Рисунок 1. Пример преобразования изображения

Следует обратить внимание на то, что этот многоугольник будет правильно описывать нужную область только если преобразование в этой области гладкое, без особых точек и разрывов. Это накладывает ограничение на преобразования, которые могут осуществляться данным алгоритмом – например, области в районе полюсов в проекции Меркатора должны быть отсечены, так как эти точки являются особыми для данной проекции.

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПИКСЕЛЕЙ ИСХОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОСЛЕ ПРОЕЦИРОВАНИЯ

Для получения результирующего изображения требуется аппроксимировать каждый пиксель области, на которую ложится преобразуемое изображение (граница этой области найдена на предыдущем этапе). Для этого нужно подвергнуть обратному преобразованию координаты пикселя результирующего изображения, найти, в какую точку полосы он ляжет, и аппроксимировать интенсивность исходя из

окрестности этой точки. В целях повышения скорости алгоритм производит эту аппроксимацию по другому. Подготовительным этапом для этого является построение матрицы распределения пикселей исходного изображения по области результирующего изображения.

Около найденной области результирующего изображения, на которую ложится преобразуемое изображение, описывается прямоугольник. Создается матрица, равная по размеру этому прямоугольнику (высота и ширина прямоугольника задается в пикселях). Таким образом, каждому пикселю в прямоугольнике сопоставляется элемент матрицы, координаты которого равны координатам пикселя.

Элементы, которые содержит матрица, являются списками структур (рис. 2). В структуре содержатся координаты одного пикселя исходного изображения, по которым можно получить его точные координаты в результирующей системе координат. Изначально все списки в матрице пустые.

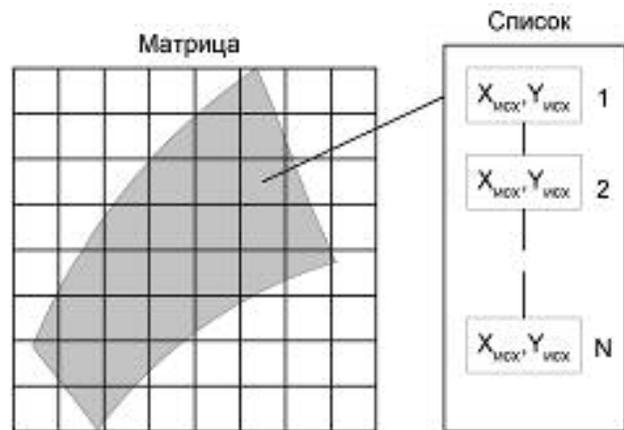


Рисунок 2. Организация матрицы, описывающей распределение пикселей по области итогового изображения

Матрица заполняется следующим образом: каждый пиксель исходного изображения проецируется на результирующее изображение, итогом чего являются его координаты в результирующей системе. По этим данным находится ближайший пиксель на результирующем изображении. По координатам этого пикселя определяется соответствующий ему элемент из матрицы, и в список, который содержится в этом элементе, добавляется структура с координатами этого пикселя на исходном изображении.

Так как преобразование в общем случае неравномерно, то спроецированные пиксели могут распределяться по выходной области также неравномерно, в зависимости от локального коэффициента сжатия и угла поворота. Поэтому матрица в общем случае будет заполнена неравномерно – в отдельных областях могут преобладать пустые элементы, в то время как в других – элементы со списками, состоящими из нескольких элементов. Если список пустой, то это значит, что в район пикселя, соответствующего данному элементу матрицы, не попало ни одного спроецированного пикселя исходного изображения, и коэффициент сжатия в данной области меньше единицы, что означает увеличение. Если в списке несколько структур – значит, в окрестность данного пикселя попало некоторое, равное числу элементов списка,

количество спроецированных пикселей исходного изображения, и коэффициент сжатия в этой области больше единицы, что соответствует уменьшению.

5. АППРОКСИМАЦИЯ ИТОГОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Построенная на предыдущем этапе матрица очень удобна для аппроксимации, так как она дает два существенных для скорости работы алгоритма преимущества.

Первое – это то, что с помощью данной матрицы можно быстро найти ближайший к данному пикселю выходного изображения спроецированный пиксель из полосы. Это делается обходом элементов-списков матрицы, начиная с элемента, соответствующему данному пикселю и далее, по его соседям, с все увеличивающимся радиусом обхода, до тех пор, пока не будет найден первый непустой элемент, который будет содержать структуру с данными о ближайшем спроецированном пикселе из полосы.

Второе – возможность быстро оценить коэффициент сжатия в локальной области данного пикселя выходного изображения. Для этого подсчитывается суммарное количество структур в ячейках матрицы в элементе, соответствующем данному пикселю и его окрестности. Коэффициент сжатия равен отношению количества попавших в данную окрестность пикселей исходного изображения (то есть суммарное количество структур), к количеству пикселей окрестности (количество элементов матрицы, по которым велся поиск структур).

В ходе аппроксимации для каждой точки области выходного изображения находится локальный коэффициент сжатия, в зависимости от которого производится выбор оптимального способа аппроксимации (бикубической или по среднему).

6. СПОСОБЫ АППРОКСИМАЦИИ

Спецификой растрового изображения, которое подвергается преобразованию, является то, что оно дискретно. Интенсивность в нем задана не для каждой точки изображения, то есть непрерывно, а для некоторого конечного набора точек, которые являются центрами пикселей. Изображение, на котором будет отображен результат преобразования, также является растровым, и поэтому для него тоже есть возможность задать только интенсивности центров пикселей. Требуется тем или иным способом аппроксимировать интенсивности пикселей итогового изображения по интенсивностям точек исходного изображения, попавшим после преобразования в различные области.

Существует несколько способов такой аппроксимации. Их можно разделить на две группы – первая включает способы, применимые для преобразований одного масштаба или растягивающих, а вторая – для сжимающих.

В первую группу входят:

- аппроксимация по ближайшему соседу – когда находится ближайшая к центру аппроксимируемого пикселя результирующего

изображения попавшая на это изображение точка исходного изображения и ее интенсивность присваивается аппроксимируемому пикселю;

- билинейная аппроксимация, в которой искомая величина получается путем линейной аппроксимации с использованием интенсивностей четырех ближайших пикселей исходного изображения, попавших после преобразования в эту область;
- бикубическая аппроксимация – тот же принцип, что и в билинейной, но аппроксимация происходит кубическими полиномами с учетом шестнадцати ближайших пикселей.

Во вторую группу входят:

- аппроксимация по среднему, основана на том, что при сжатии несколько пикселей исходного изображения переходят в один пиксель итогового, и интенсивность результирующего пикселя аппроксимируется средней интенсивностью исходных, что соответствует физической модели фотоприемников и человеческого зрения;
- аппроксимация по максимуму гистограммы – из цветов нескольких пикселей, попавших в один, выбирается наиболее часто встречающийся и его значение присваивается аппроксимируемому пикселю.

Из перечисленных методов два подходят для индексных изображений (в таких изображениях значение пикселя не имеет смысла интенсивности, а обозначает номер цвета из некоторой палитры доступных цветов), в которых после преобразования не должно образовываться новых цветов – это методы аппроксимации по ближайшему соседу и по максимуму гистограммы. Для изображений интенсивности применимы все способы аппроксимации, хотя последний (по максимуму гистограммы), по-видимому, не целесообразен, так как включает в себя некоторую разновидность фильтрации и не соответствует физическим моделям фотоприемных устройств.

7. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Так как алгоритм должен обеспечивать выбор оптимального способа аппроксимации, дающего минимальную ошибку в конкретных условиях, требовалось провести сравнение способов аппроксимации. Сначала, для сравнения методов при преобразованиях в одном масштабе, тестируемое изображение подвергалось двадцатикратному повороту. Сравнялось три метода аппроксимации – по ближайшему соседу, билинейная и бикубическая. Аппроксимации по среднему и по максимуму гистограммы не применялись, так как при коэффициентах сжатия меньших или равных единице они вырождаются в аппроксимацию по ближайшему соседу. Визуальный анализ качества получившихся в итоге поворотов изображений показал, что наихудшие результаты показывает метод аппроксимации по ближайшему соседу. Методы бикубической и билинейной аппроксимации по качеству оказались гораздо лучше, но было замечено, что билинейная

аппроксимация существенно больше размывает границы, чем бикубическая, что особенно хорошо заметно при последовательном многократном повороте изображения. Из этого следует вывод, что при преобразованиях одного масштаба наиболее эффективным является метод бикубической аппроксимации.

Для оценки поведения методов аппроксимации в условиях разномасштабных преобразований было определено качество различных способов аппроксимации при различных коэффициентах сжатия. Тестовое изображение сжималось, с коэффициентами сжатия меняющимися от 10 до 0.5. Каждый раз сжатие проводилось с использованием пяти различных способов аппроксимации. После этого все полученные изображения, а также исходное, растягивались методом бикубической аппроксимации до одинакового размера, после чего считалась ошибка аппроксимации по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{W * H} \cdot \sum_{x,y} |I_{x,y}^0 - I_{x,y}|$$

Где $I_{x,y}^0$ - интенсивность пикселя с координатами (x,y) на исходном изображении, а $I_{x,y}$ - интенсивность пикселя (x,y) на экспериментальном изображении, W и H – ширина и высота изображения в пикселях.

Из анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы: при коэффициентах сжатия 1.6 и меньше наилучшие результаты показывает бикубическая аппроксимация, а при больших – аппроксимация по среднему. Билинейная аппроксимация близка по качеству к бикубической, но все же немного хуже. Аппроксимация по ближайшему соседу значительно хуже бикубической и билинейной, кроме случаев когда коэффициент сжатия кратен размеру изображения – 0.5, 1, 2, 3, 4 – в этих случаях наблюдается резкое улучшение качества, что объясняется тем, что при преобразовании несколько точек точно попадают в один пиксель. Метод максимума гистограммы выгоден только для индексных изображений и при больших коэффициентах сжатия (как минимум более 10).

В итоге для использования в алгоритме было выбрано два способа аппроксимации – бикубическая для коэффициентов сжатия 1.6 и менее, и по среднему, для больших коэффициентов сжатия.

8. ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ ПЕРЕВОДА СПУТНИКОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ГЕОГРАФИЧЕСКУЮ ПРОЕКЦИЮ

В качестве исходных данных для алгоритма предоставляются серое изображение (возможно несколько изображений с разных спектральных каналов) полученное со спутника, библиотека, которая вычисляет географические координаты пикселей исходного изображения, а также задана географическая проекция, в которую надо перевести исходное изображение. Про результирующее изображение известны его координаты относительно центра проекционной системы координат и масштаб. Эти данные используются для

вычисления координат пикселей результирующего изображения в проекционной системе координат.

Так как многие алгоритмы вычисления географических координат по баллистическим данным считают только вперед по времени, то накладывается ограничение: координаты каждой точки можно получить только один раз, без возможности отката назад. Из-за этого, а также для экономии машинных ресурсов производится преобразование не сразу всего изображения, а по отдельности, полоса за полосой. Полоса изображения – это набор строк, сканированных спутником за некоторый промежуток времени. Проецирование осуществляется следующим образом: полоса изображения с фиксированным количеством строк считывается в буфер, проецируется, за ней считывается следующая, и так далее. Так как многим методам аппроксимации требуются интенсивности нескольких соседних пикселей, то, для избежания искажений на краях полос, осуществляется их небольшое перекрытие. Проецирование полосы ничем принципиально не отличается от проецирования всего изображения.

9. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА

Описанный алгоритм перевода изображения со спутника в географическую проекцию был применен для разработки библиотеки классов на языке C++ для перевода изображений, получаемых со спутников серии NOAA в географическую проекцию. Реализован перевод в проекцию Меркатора (Mercator), поперечную проекцию Меркатора (Transverse Mercator), UTM (Universal Transverse Mercator), полярную стереографическую проекцию (Universal Polar Stereographic), а также в проекции Lambert Equal Area Azimuthal, Equidistant Cylindrical и Plate Caree. На рис. 3-8 представлены исходное изображение Аппенинского полуострова полученное со спутника и результат его перевода в проекции Lambert Equal Area Azimuthal, Universal Polar Stereographic, Transverse Mercator, Plate Caree, Mercator. Библиотека также позволяет осуществлять одновременное преобразование изображений с нескольких спектральных каналов, поддерживает работу с RGB изображениями. Возможно совмещение нескольких снимков на одном выходном изображении в одной проекции.

В дальнейшем планируется применить разработанный алгоритм для обработки изображений со спутника Terra, с прибора MODIS. Характерная особенность этого спутника в том, что в один промежуток времени сканирование в нем осуществляется не одной строки, а полосы из фиксированного количества строк и изображение, посылаемое спутником, составляется из этих полос. Это приводит к возникновению следующей проблемы: зона земной поверхности, захватываемая полосой, не является прямоугольной, а является узкой в середине (непосредственно под спутником) и расширяется к краям. Такой эффект является следствием сферичности Земли и аппаратных искажений. Таким образом, на полученном со спутника изображении две соседние полосы по краям дублируют некоторый участок поверхности Земли, и, кроме того, географические координаты точек на границе полос резко меняются. Эта проблема решается разработанным алгоритмом, путем установления количества строк в буфере

равным количеству строк сканируемой спутником полосы. Путем незначительной модификации алгоритма возможно в случае повреждения части полосы восстановить картину поверхности за счет игнорирования поврежденного участка и наложения на это место изображения с соседних полос.

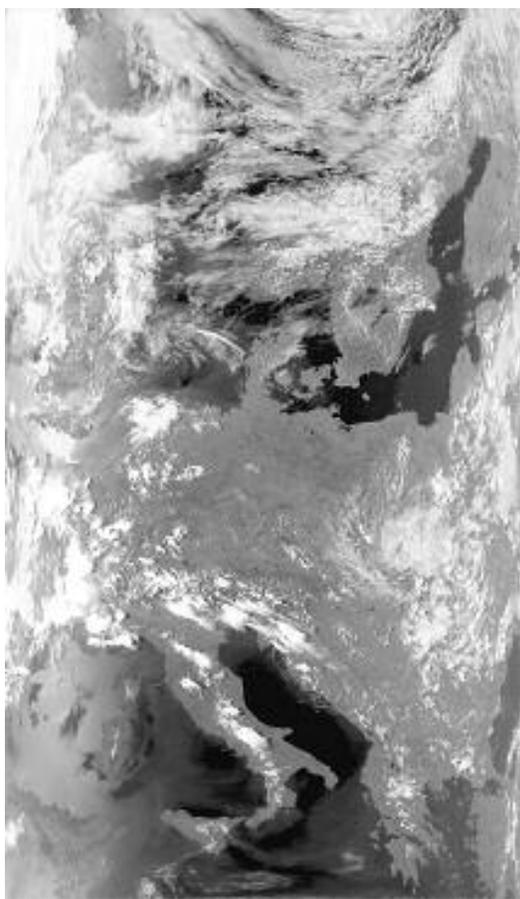


Рисунок 3. Исходное спутниковое изображение

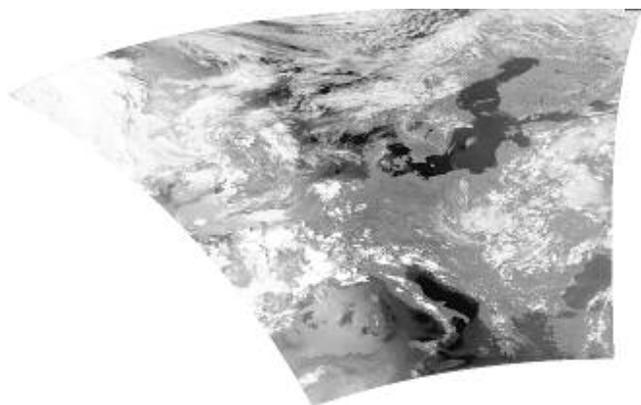


Рисунок 4. Проекция Lambert Equal Area Azimuthal

Стоит также отметить, что полученный алгоритм применим не только для перевода в географические проекции. Фактически, преобразование, которое он осуществляет, может быть задано произвольно, что позволяет использовать данный алгоритм в таких задачах, как исправление аппаратных пространственных искажений, совмещение

нескольких разновременных перекрывающихся изображений в одно, построение проекций трехмерных объектов и натягивание плоских изображений на трехмерные объекты.

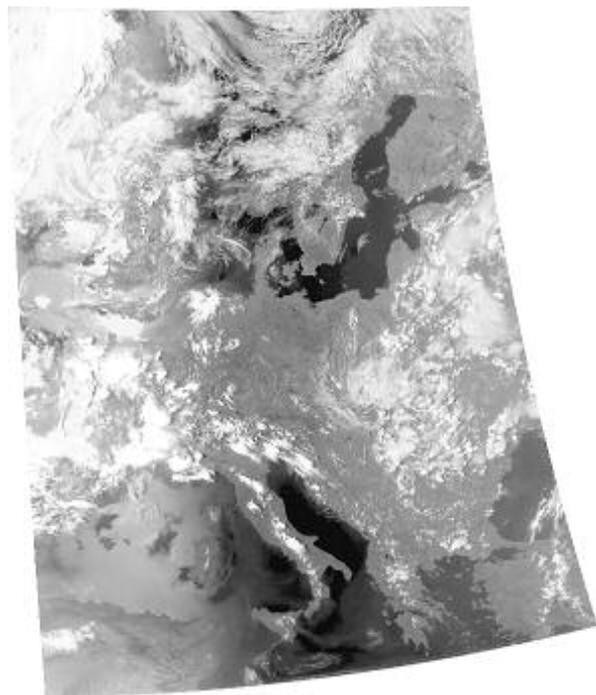


Рисунок 5. Проекция Universal Polar Stereographic

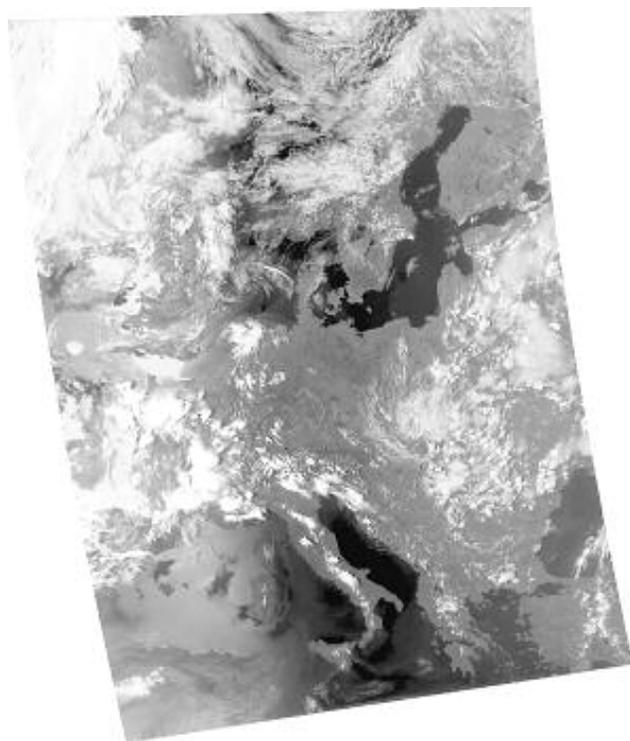


Рисунок 6. Проекция Transverse Mercator

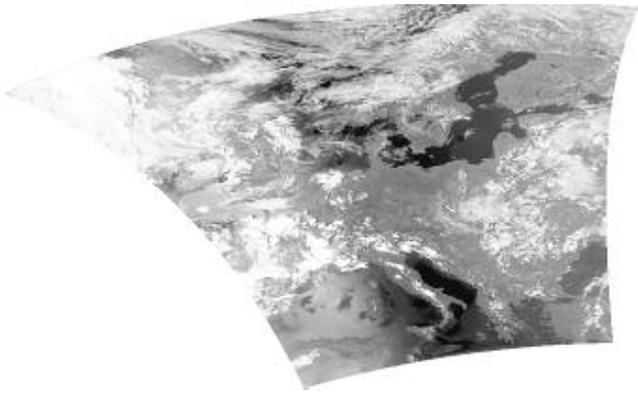


Рисунок 7. Проекция Plate Caree

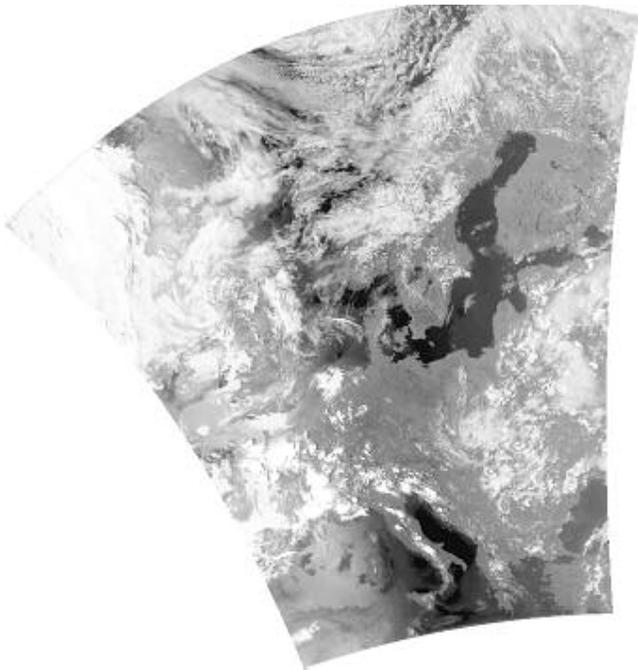


Рисунок 8. Проекция Mercator

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьёв А.Д. Математическая картография. – изд. Недра, Москва, 1969.
- [2] G. Goodrum, K.B. Kidwell, W. Winston, NOAA KLM Users Guide, 1999.
- [3] Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн.1 – 312 с., ил., Кн.2 – 480 с., ил.
- [4] Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. – М. Радио и связь, 1987. – 296с.:ил.
- [5] J. Mao, A. Jain, Texture classification and segmentation using multiresolution simultaneous autoregressive models, Pattern Recognition J 25 (2) (1992) 173-188.
- [6] W. Y. Ma and B. S. Manjunath, NETRA: A toolbox for navigating large image databases, Proc. IEEE International Conference on Image Processing, Santa Barbara, California, Vol. I, pp. 568-571, Oct 1997.

[7] J.M. Morel, G. Koepfler, C. Lopez. A multiscale algorithm for image segmentation by variational method. SIAM Journal on Numerical Analysis, 31(1):282-299, February 1994.

[8] Tony Jebara, Ali Azarbayejani and Alex Pentland. 3D Structure from 2D Motion. IEEE Signal Processing Magazine, 16(3), May 1999.

[9] Conrad I. Poelman, Takeo Kanade, A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery, CMU Robotics Institute, Technical Report CMU-CS-92-208, 11 December 1993.

Об авторах

Непомнящий Павел Владимирович, студент 6го курса Московского Физико-Технического Института, факультет Физической и Квантовой Электроники, кафедра Центр Открытых Систем и Высоких Технологий.

E-mail: npv@cos.ru

Юрин Дмитрий Владимирович, кфмн.

E-mail: yurin@cos.ru