

АЛГОРИТМ УМЕНЬШЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ

А.Г. Терехов, Н.Р. Муратова

*Институт космических исследований Министерства образования и науки Республики Казахстан
(ИКИ МОН РК). E-mail: nmuratova@mail.kz*

Спутниковые данные дистанционного зондирования всегда имеют определенные пространственные искажения. Тематическая обработка спутниковой информации требует регуляризации исходной информации с приведением ее к матрице с пикселями, имеющими одинаковое пространственное разрешение, и в соответствии с требуемой картографической проекцией. Решение этих задач обеспечивает процедура геометрической коррекции. Предлагается простой алгоритм, представляющий собой замену каждого пикселя в исходной матрице на группу пикселей (например, 5×5) с сохранением оригинальных канальных характеристик и после проведения геометрической коррекции, возврат к стартовым условиям. На тестовом примере (NOAA/AVHRR, второй канал) проанализировано влияние операции вращения ($+45^\circ$, $+45^\circ$, -90°) на корреляцию пиксельных канальных значений между изображениями до и после поворотов. Показано, что коэффициент корреляции увеличивается от 0,729 до 0,959 при использовании замены 3×3 , до 0,980 при 5×5 и до 0,999 при 40×40 .

Введение

Основная трудность использования данных среднего и низкого разрешения в количественной оценке состояния вегетации — это проблема совмещения разномасштабных данных при калибровке спутниковой информации. Необходимо сопоставить практически точечную наземную информацию с пикселями спутниковых изображений, имеющих значительный пространственный размер. Например, пространственное разрешение спутниковых данных составляет для NOAA/AVHRR 1 км (пиксель — 100 га), для 1-го, 2-го каналов TERRA/MODIS 250 м (пиксель — 6,25 га). Площадь визуального наземного обследования на поле не превышает 0,5 га (50×100 м). Наиболее типичные места описываются детально. Обычно обследуются тестовые фрагменты поля площадью 1 м^2 . При этом фиксируются на площадках с размером в 1 м^2 основные параметры вегетации, формирующие урожайность: фаза развития, высота растений, состояние листового покрытия, плотность продуктивных стеблей, число зерен в колосе и др. Масштаб анализируемого пикселя в данных дистанционного зондирования много больше обследуемой площади на сельскохозяйственных полях (0,5 га). При этом возникает необходимость соотносить данные наземного обследования фактически к одному пикселу спутникового изображения. Поэтому спектральные значения отдельного пикселя и их изменения в процессе от записи первичных данных на станции приема до стадии тематической обработки очень важны.

Предварительная обработка космических изображений состоит из нескольких процедур, в числе которых находится и геометрическая коррекция, включающая линеаризацию данных дистанционного зондирования для учета кривизны Земли и географическую привязку к базовой топографической основе. Такая обработка необходима для трансформации исходно принятой со спутника информации (данные оптической и записывающей систем спутникового сенсора) в цифровые изображения соответствующей картографической проекции. В дальнейшем именно такие изображения поступают для тематической обработки.

В процессе геометрической коррекции используются различные операции трансформации исходной матрицы: вращение, масштабирование, искажение и т. д. При этом неизбежно определенное изменение исходной информации. Исходные значения элементов матрицы заменяются другими в зависимости от значений соседних элементов. Очевидно, что минимальные изменения будут наблюдаться при трансформации крупных однородных зон,

а максимальные — у сильноконтрастных, мозаичных текстур. В общем случае, искажение исходной информации носит характер сглаживающей фильтрации.

Влияние геометрической коррекции на значения пикселей

Для оценки масштаба влияния геометрической коррекции на исходные спутниковые данные выбран фрагмент космической съемки NOAA/AVHRR для сельскохозяйственной территории Акмолинской области. Время съемки — период колошения-цветения яровых зерновых культур (начало августа 2002 г.), когда наблюдался максимум зеленой биомассы. Фрагмент территории выбран таким образом, чтобы он включал типичные для местности объекты: яровые посевы, пастбища, луга и водоемы. Анализировались значения 2-го канала NOAA/AVHRR (730–1100 нм). В качестве операции трансформации, моделирующей геометрическую коррекцию, выбрано вращение. Поворот как одна из процедур геометрической коррекции всегда присутствует при трансформации данных, получаемых со спутников, находящихся на гелиосинхронных орбитах, в том числе и спутников NOAA и TERRA, поскольку траектории их движения образуют угол 30–50° к направлению север – юг. Система из трех последовательных операций поворота: (+45, +45, –90°) — возвращает все позиции матрицы на исходные места, что позволяет достаточно легко генерировать искажения в канальных значениях, моделирующие геометрическую коррекцию. В прикладных задачах количественной оценки состояния растительного покрова, как правило, ищутся наиболее простые, линейно регрессионные связи между спектральными и физиологическими характеристиками растительности. Поэтому для оценки масштаба возникших искажений рассчитывалась величина корреляции между пиксельными значениями до и после модельной трансформации (рис. 1, 2).

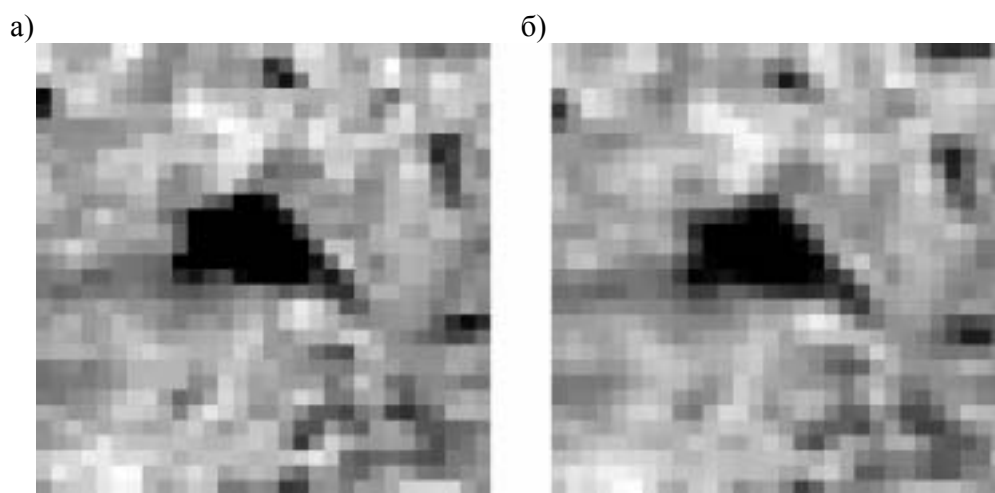


Рис. 1. Тестовое изображение до (а) и после (б) операции вращения (+45, +45, –90°). NOAA/AVHRR, канал 2 (730–1100 нм), фрагмент с.-х. территории Акмолинской области, 3 августа 2002 г.

Уравнение линейной регрессии между пиксельными значениями до и после тестовой трансформации изображения с возвратом его в исходный вид, вместо ожидаемого $Y = X$ имело вид $Y = 0,7131X + 47,287$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,7294$. Изменения в уравнении регрессии вызваны сглаживающим эффектом геометрической трансформации: низкие канальные значения увеличились, высокие — уменьшились. Таким образом, даже если первоначально существует однозначная связь между физиологическими и спектральными свойствами вегетации, то после геометрической коррекции изображения и приведения его к картографической проекции эта взаимосвязь существенно искажается.

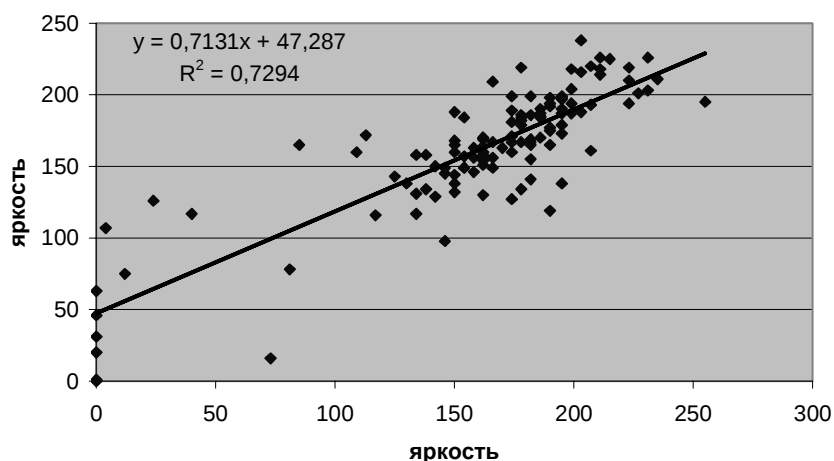


Рис. 2. Корреляция между пиксельными значениями тестовых изображений до и после операции вращения (+45, +45, -90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г.

Процедура усреднения и геометрической коррекции

Стандартная точность геопривязки космических снимков составляет 1 пиксель. Поэтому при сопоставлении точечной наземной информации и спутниковых данных обычно проводят усреднение по соседним пикселям, примыкающим к координатам точки наземного обследования. Таким образом, минимизируют возможные ошибки геопривязки. Рассмотрим влияние тестовой процедуры вращения на исходные данные после процедуры усреднения: 2×2 в 1 пиксел (рис. 3, 4) и 3×3 в 1 пиксел (рис. 5, 6).

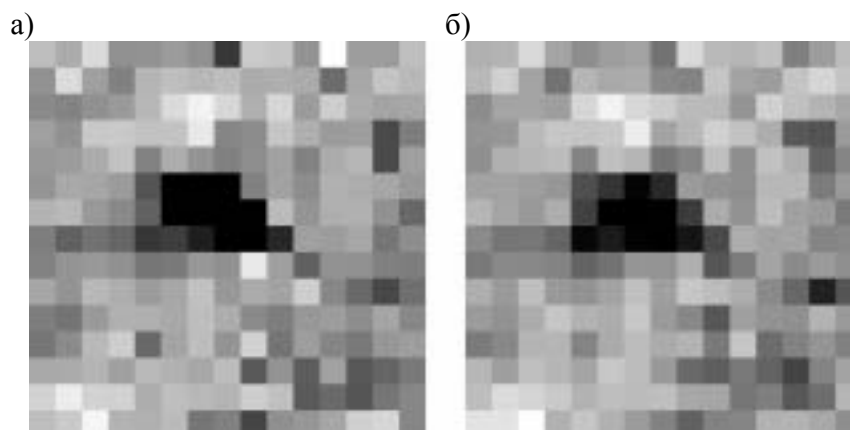


Рис. 3. Усредненное по схеме 2×2 в 1 пиксел тестовое изображение до (а) и после (б) операций вращения (+45, +45, -90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002г. .

После предварительной операции сглаживающей фильтрации спутниковых данных общая текстура изображения изменяется в сторону более сглаженной. На рис. 4 и 6 приведены результаты корреляционного анализа, идентичного представленному на рис. 2, только с дополнительной стадией усредняющей трансформации исходных данных. Цель проведения сглаживающей трансформации — это объединение части пикселей по схеме: 2×2 в 1 пиксель (рис. 3) и 3×3 в 1 пиксель (рис. 5) с уменьшением размера изображения соответственно в 4 раза и в 9 раз. Коэффициенты в уравнениях регрессии в этих примерах и приближаются к ожидаемой величине 1,0: 0,7131 (рис. 2); 0,8707 (рис. 4); 0,9165 (рис. 6). Однако коэффициенты корреляции R^2 в сериях остаются невысокими: 0,7294; 0,8471; 0,7973, что требует большого числа контрольных точек для устойчивого определения формулы

уравнения регрессии. При практическом применении усреднения 2×2 или 3×3 пикселя в данных NOAA/AVHRR требуется поиск мест, где наземное обследование площади порядка 0,5 га было бы представительно для территории 2×2 км (400 га) или 3×3 км (900 га). Число таких мест ограничено, и при таком подходе трудно набрать достаточное количество тестовых полей для уверенного определения калибровочного уравнения.

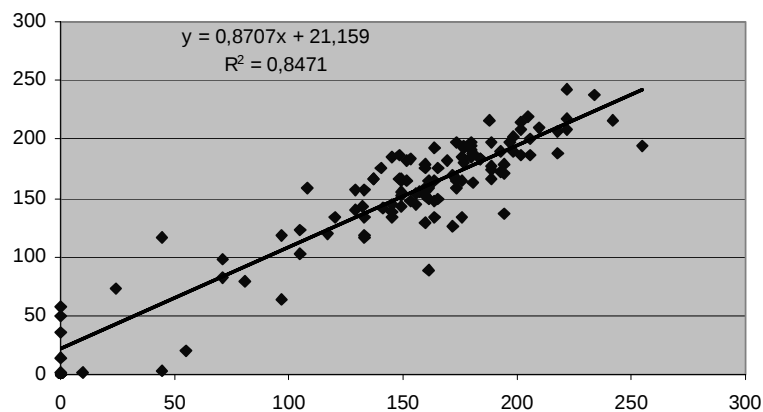


Рис. 4. Корреляция между пиксельными значениями усредненных по схеме 2×2 в 1 пиксел тестовых изображений до и после операции вращения (+45, +45, -90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г.

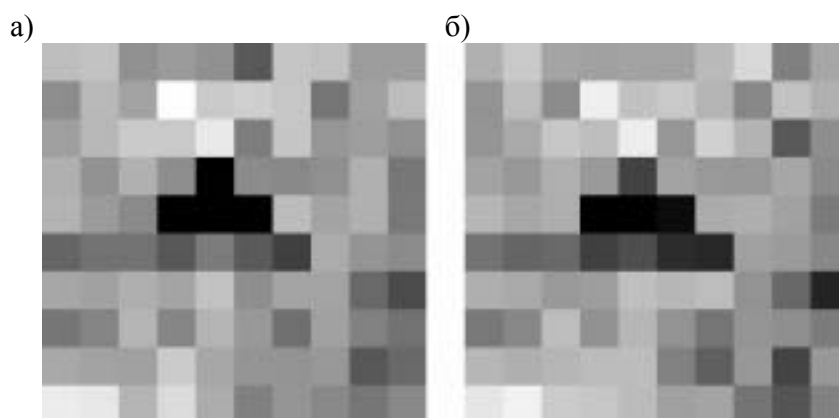


Рис. 5. Усредненное по схеме 3×3 в 1 пиксел тестовое изображение до (а) и после (б) операций вращения (+45, +45, -90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г.

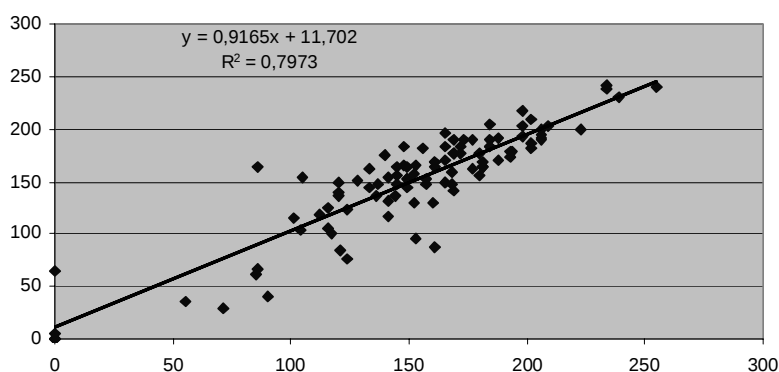


Рис. 6. Корреляция между пиксельными значениями усредненных по схеме 3×3 в 1 пиксел тестовых изображений до и после операции вращения (+45, +45, -90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г.

Методика защиты оригинальных пиксельных значений

Наличие пространственного градиента в спектральных характеристиках спутниковых снимков приводит к искажениям оригинальных пиксельных значений в процессе геометрической коррекции. Сопоставление точечных данных наземных обследований с искаженными пиксельными значениями создает ошибки при калибровке спутниковых данных. Поэтому возникает необходимость в специальной процедуре защиты информации, первоначально фиксируемой станцией приема, от сглаживающего эффекта геометрической коррекции.

В однородных зонах геометрическая коррекция не искажает пиксельные значения. Этот эффект можно использовать для защиты от искажений геометрической коррекции. Каждый пиксель исходного изображения заменяется матрицей пикселей со спектральными характеристиками «родительского» пиксела. При этом происходит замена каждого исходного пикселя на однородную по спектральным характеристикам зону, величина которой может произвольно регулироваться. Если исходная текстура спутникового снимка является малококонтрастной, возможно, достаточно преобразования 3×3 . Для сильнококонтрастного случая, возможно, потребуется преобразование одного пикселя в матрицу 10×10 и более. Чем в большую матрицу преобразуется исходный пиксель, тем меньше искажение при геометрической коррекции, но тем сильнее увеличивается размер обрабатываемых изображений. Для случая преобразования одного пикселя в матрицу 3×3 размер изображения увеличивается в девять раз, для 10×10 — соответственно в 100 раз. Подобная процедура защиты оригинальной информации требует значительных компьютерных мощностей при расчете геометрической коррекции полных спутниковых сцен. Небольшие фрагменты могут обрабатываться практически без затруднений. На рис. 7–10 приведены результаты тестирования влияния системы вращений ($+45^\circ$, $+45^\circ$, -90°) на спутниковое изображение, предварительно защищенное с помощью процедур трансформации 1 пиксель в 40×40 , 5×5 и 3×3 . Коэффициенты в уравнениях регрессии в этих примерах близки к ожидаемой величине 1,00: 0,9675 (рис. 8); 0,9168 (рис. 9); 0,9724 (рис. 10). Коэффициенты корреляции R^2 в этой серии также высокие: 0,9981; 0,9804; 0,9592, что говорит об отсутствии значимых искажений в процессе тестовой геометрической коррекции.

Таким образом, процедура защиты позволяет предотвратить искажение оригинальной спутниковой информации в процессе геометрической коррекции и привести ее к определенной картографической проекции (рис. 11).

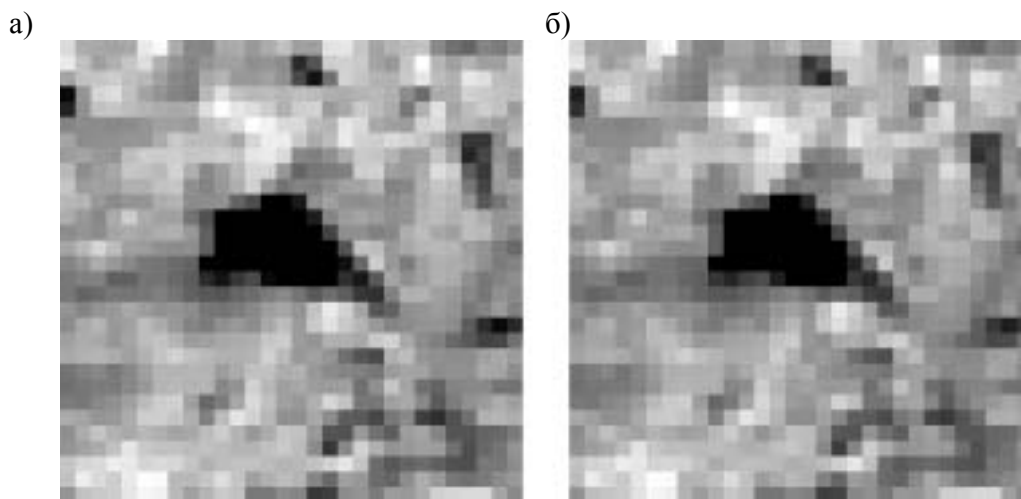


Рис. 7. Защищенное с помощью трансформации 1 пиксель в 40×40 тестовое изображение до (а) и после (б) операций вращения ($+45^\circ$, $+45^\circ$, -90°). NOAA/AVHRR, канал 2, фрагмент Акмолинской области, 3 августа 2002 г.

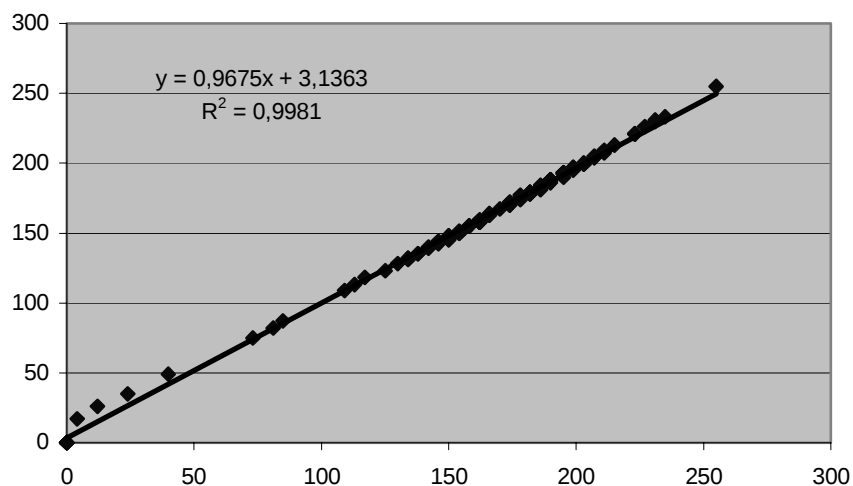


Рис. 8. Корреляция между пиксельными значениями защищенных по схеме 1 пиксел в 40×40 тестовых изображений до и после операции вращения (+45, +45, −90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г..

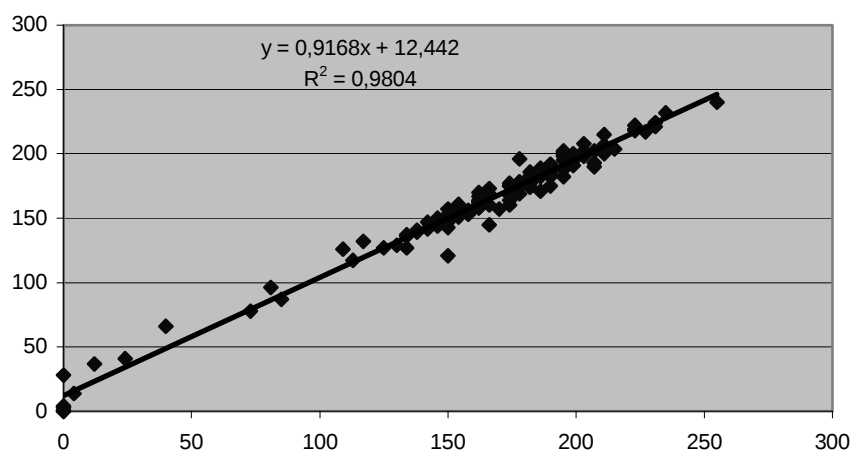


Рис. 9. Корреляция между пиксельными значениями защищенных по схеме 1 пиксел в 5×5 тестовых изображений до и после операции вращения (+45, +45, −90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г.

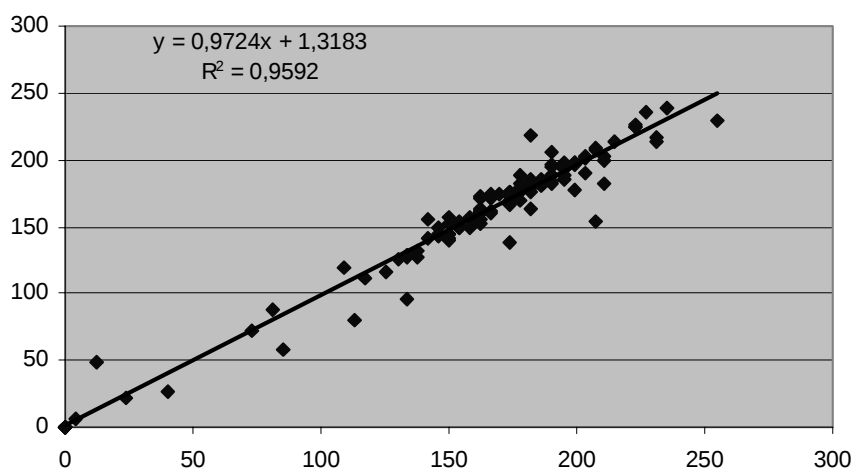


Рис. 10. Корреляция между пиксельными значениями защищенных по схеме 1 пиксел в 3×3 тестовых изображений до и после операции вращения (+45, +45, −90°). NOAA/AVHRR, канал 2, 3 августа 2002 г.

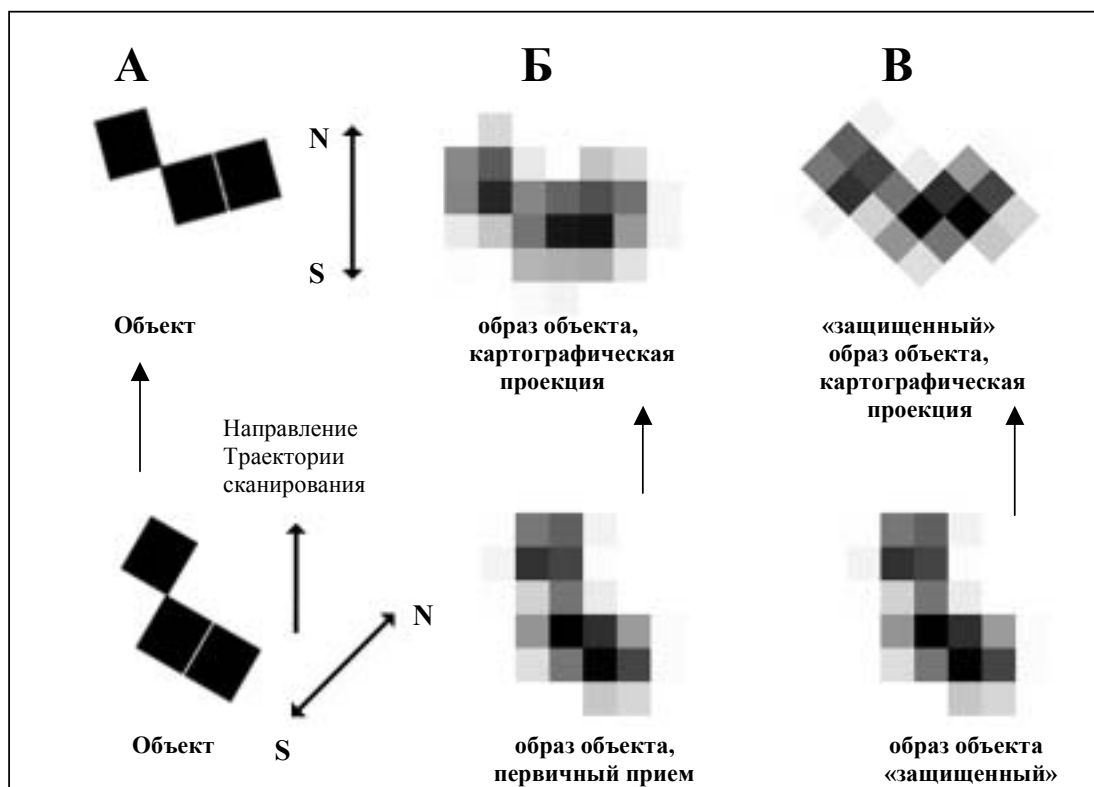


Рис. 11. Схема работы операции защиты данных первичного приема (трансформация 1 пиксел в 20×20) от сглаживающего эффекта при геометрической коррекции и трансформации в картографическую проекцию: А — объект на поверхности Земли; Б — спутниковый образ объекта, при сопоставимом масштабе размера объекта и пространственного разрешения сенсора, первичный прием и картографическая проекция; В — спутниковый образ объекта в защищенном режиме, первичный прием и картографическая проекция

Заключение

Стадия геометрической коррекции спутниковых данных, всегда присутствующая в процессе тематической обработки, может существенным образом изменять каналные значения отдельных пикселей, особенно при мозаичной и контрастной текстуре снимка. Это важно при сопоставлении данных наземного обследования и спутниковой информации или работе с составными пикселями. Рассмотренные выше методы уменьшения искажений, вызываемых геометрической коррекцией, безусловно, полезны. Однако наиболее надежным является проведение наземного обследования таким образом, чтобы пространственный масштаб наземного полигона был существенно больше разрешения спутниковых данных и соответственно описывался некоторой совокупностью пикселей. Определенным выходом из создавшегося положения может также служить использование спутниковых данных высокого разрешения с дальнейшим построением двух калибровочных кривых: первой, связывающей наземную информацию и спутниковые спектральные характеристики высокого разрешения; второй — спутниковые спектральные характеристики высокого разрешения с такими характеристиками среднего или низкого разрешения. Можно попытаться использовать несколько сенсоров с различным разрешением, размещенных на одной спутниковой платформе. Например, каналы на CBERS-1: CCD, канал 4 (770–890 нм, разрешение 19,5 м, ширина обзора 113 км) и WFI, канал 11 (770–890 нм, разрешение 258 м, ширина обзора 890 км). При наличии оперативного доступа к информации использование данных с одной спутниковой платформы более предпочтительно.