



3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СЦЕНАМ, ПОЛУЧЕННЫХ С LANDSAT 8, В СРЕДЕ ArcGIS

Цель работы: получить навыки применения алгоритма оценки температуры земной поверхности (LST) по снимку Landsat 8 с использованием NDVI и PVI для расчета отражающей способности земной поверхности.

Задание работы:

- 1) выполнить конвертацию значений яркости пикселей канала B10 в спектральную плотность энергетической яркости;
- 2) выполнить конвертацию значений яркости пикселей каналов B4 и B5 в значения отраженной солнечной радиации, поступившей на датчики спутника;
- 3) откорректировать конвертированные растры каналов B4 и B5 с учетом угла стояния солнца в момент съемки;
- 4) определить величину вегетационного индекса NDVI и значение P_V , используя конвертированные и откорректированные каналы B4 и B5;
- 5) определить радиояркостную температуру земной поверхности по значениям теплового канала B10;
- 6) конвертировать радиояркостную температуру земной поверхности в температуру земной поверхности, определенную в градусах Цельсия.

Исходные данные для выполнения работы: результаты дистанционного зондирования, полученные спутником Landsat-8, охватывающие часть районов Могилевской области Республики Беларусь и Смоленской области Российской Федерации. Получить подобные данные возможно на безвозмездной основе, пройдя простую процедуру регистрации на официальном сайте геологической службы США (USGS).

Температуру земной поверхности можно оценить по термальным спектральным каналам сенсора, то есть по таким каналам, которые снимают земную поверхность в диапазоне Thermal Infrared Radiation (длина волн 10–15 микрометров). Соответственно, эти каналы называются Thermal bands, TIRS Bands или Thermal Infrared bands.

В целом, существующие данные ДЗЗ по термальным спектральным каналам можно разделить на два класса в зависимости от масштаба (в

скобках указано число метров поверхности в 1 пикселе снимка термального канала и годы получения данных):

- данные ДЗЗ температуры земной поверхности **мелкого масштаба** – MODIS (500 и 1000 м; 2000 – настоящее время), сенсоры спутников Terra, Aqua; Suomi NPP (650 м, 2011 – настоящее время):

- данные ДЗЗ температуры земной поверхности **среднего масштаба** – ASTER (90 м, 2000 – настоящее время), сенсор спутника Terra; Landsat 8 (100 м, 2013 – настоящее время); Landsat 7 (60 м, 1999 – настоящее время); Landsat 5 (120 м, 1984-2013); Landsat 4 (120 м, 1982-1993).

У сцен, полученных с Landsat 8, термальными спектральными каналами являются каналы B10 и B11 (табл. 1).

Таблица 1. – **Спектральные диапазоны термальных каналов сенсоров Landsat-8**

Спектральный канал	Длины волн, мкм	Разрешение (размер 1 пикселя), м
Канал 10 - дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10,30-11,30	100
Канал 11 - дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11,50-12,50	100

Для научных и практических исследований регионального масштаба наибольшую ценность представляют данные температуры земной поверхности среднего масштаба, лучшими из которых считают данные Landsat 8. Сцены Landsat 7 начиная с 31 мая 2003 г. идут с дефектом, который не отражается на точности данных, но значительно сокращает их объем и снижает удобство их использования (усложняет обработку). Однако разрешение термального канала Landsat 7 (60 м) при этом остается самым высоким из когда-либо существовавших в открытом доступе.

Все данные, получаемые с Landsat 4, 5, 7 и 8 поставляются пользователям уже с геометрической и радиометрической коррекцией. Таковыми, в частности, являются сцены, называемые в наборах данных Landsat Level-1 Data Processing Levels или Landsat Level-1 data product или L1TP. Пользователю необходимо выполнить только дополнительную атмосферную коррекцию сцен Landsat.

Продукт Landsat Level-2 или Surface Reflectance Product, имеющийся в свободном доступе в ограниченном количестве преимущественно для территории США, для которого атмосферная коррекция выполнена полностью, содержит каналы с 3 по 7, и в нем отсутствуют термальные каналы. По этой причине его нельзя использовать для изучения температуры земной поверхности.

Для внесения корректировок на величину отражающей способности земной поверхности в зависимости от периода съемки целесообразно использовать либо индекс NDVI, либо постоянную величину 0,98.

Выполнение работы:

1. Выполнение конвертации растра канала B10 из стандартных значений пиксела в спектральную плотность энергетической яркости. Для этого необходимо загрузить растр канала B10 сцены Landsat 8 и выполнить его конвертацию в TOA spectral radiance – спектральную плотность энергетической яркости. Для вычисления TOA spectral radiance используют формулу (1):

$$R_1' = M_1 * Q_{cal} + A_r \quad (1),$$

где R_1' – TOA спектральная яркость, Вт/(м² * ср * мкм);

Q_{cal} – квантованные и откалиброванные значения стандартного пикселя продукта (DN) – исходные значения растра в каналах TIRS;

M_1 – коэффициент мультипликативного изменения масштаба для метаданных, зависящий от спектрального канала (RADIANCE_MULT_BAND_x, где x – номер канала);

A_r – аддитивный коэффициент масштабирования для метаданных, зависящий от спектрального канала (RADIANCE_ADD_BAND_x, где x – номер канала).

Значения коэффициентов где M_1 и A_r берутся из файла с метаданными_MTL.txt, присутствующего в комплекте данных сцены.

Для выполнения конвертирования растра используются функциональные возможности инструмента Калькулятор растра набора инструментов Алгебра карт (рис. 1).

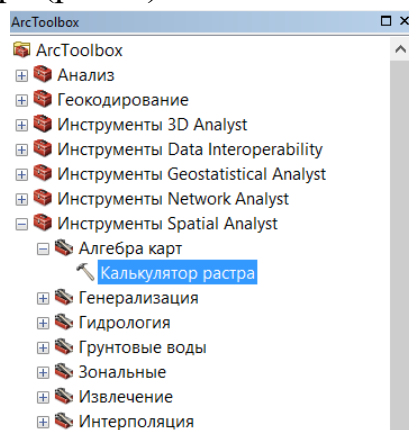


Рис. 1. Окно ArcToolbox с выбранным инструментом

В диалоговом окне калькулятора растров в поле Выражение Алгебры карт следует прописать выражение, как показано на рис 2.

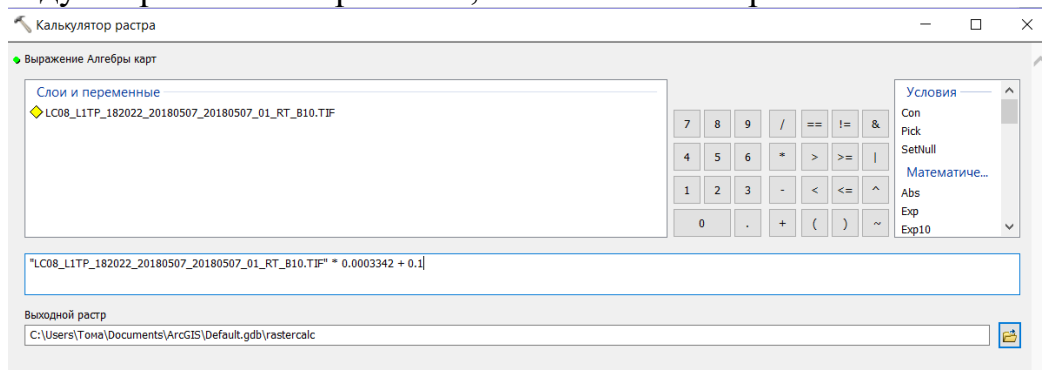


Рис. 2. Диалоговое окно калькулятора растра

2. Выполнение корректирования конвертированного растра канала 10 с учетом угла стояния солнца в момент съемки. Корректировку отражательной способности TOA с учетом угла стояния солнца в момент съемки выполняют по формуле (2):

$$R_2' = R_1' / \cos(\theta_{SZ}) \text{ или } R_1' / \sin(\theta_{SE}) \quad (2),$$

где: R_2' – TOA планетарный коэффициент отражения, Вт/(м² * ср * мкм);

R_1' – TOA коэффициент отражения без поправки на солнечный угол, Вт/(м² * ср * мкм);

θ_{SE} – высота стояния Солнца над горизонтом в момент съёмки; сведения о высоте стояния Солнца над горизонтом в момент съемки содержатся в файле MTL.txt с метаданными сцены_, присутствующем в комплекте данных сцены Landsat-8; $\theta_{SZ} = 90 - \theta_{SE}$.

Значения высоты стояния Солнца над горизонтом в момент съёмки в файле с метаданными приведено в градусах, поэтому перед подстановкой в формулу (2) его необходимо перевести в радианы, исходя из того, что 1 градус = 0,0174533 радиана.

Для выполнения корректирования растра в диалоговом окне калькулятора следует прописать выражение, как показано на рис. 3.

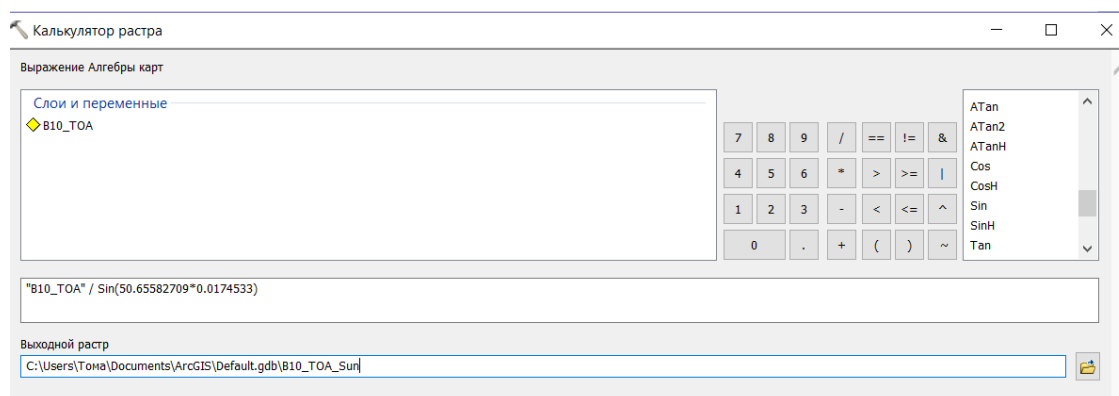


Рис. 3. Диалоговое окно калькулятора растра

3. Определение величины вегетационного индекса NDVI и значения P_V с использованием каналов B4 и B5. Расчет величины NDVI производится по формуле (3):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (3),$$

где: NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра (канал B5 берется из сцены без корректировки и конвертации);

RED – отражение в красной области спектра (канал B4 берется из сцены без корректировки и конвертации).

Расчет величины вегетационного индекса NDVI выполняют, используя каналы B4 и B5 сцены Landsat 8, без проведения их корректирования. Следует помнить, что максимальная величина индекса не должна превышать единицу, а минимальная – минус один. Для выполнения расчетов также

используют калькулятор растра, прописав в соответствующем поле выражение, как показано на рис. 4.

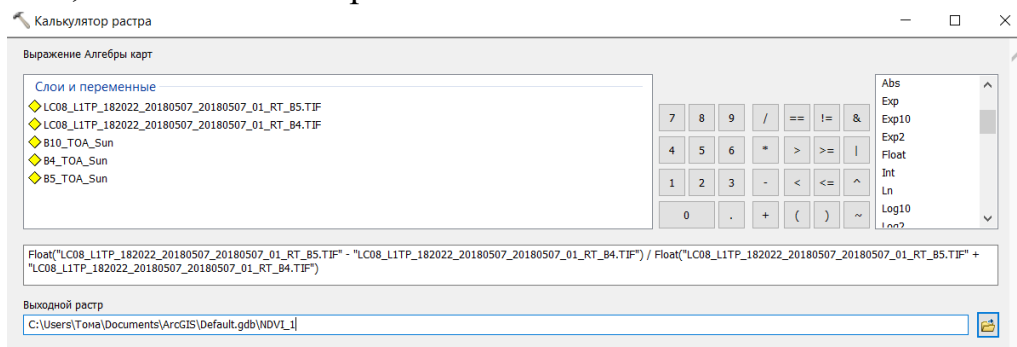


Рис. 4. Диалоговое окно калькулятора растра

4. *Определение величины P_V .* Расчет величины P_V производится по формуле (4):

$$P_V = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2 \quad (4)$$

Для выполнения расчетов используется калькулятор растра, в диалоговом окне которого в соответствующем поле прописывается выражение, как показано на рис. 5. Для возведения величины P_V в квадрат в начале выражения следует поставить оператор Square.

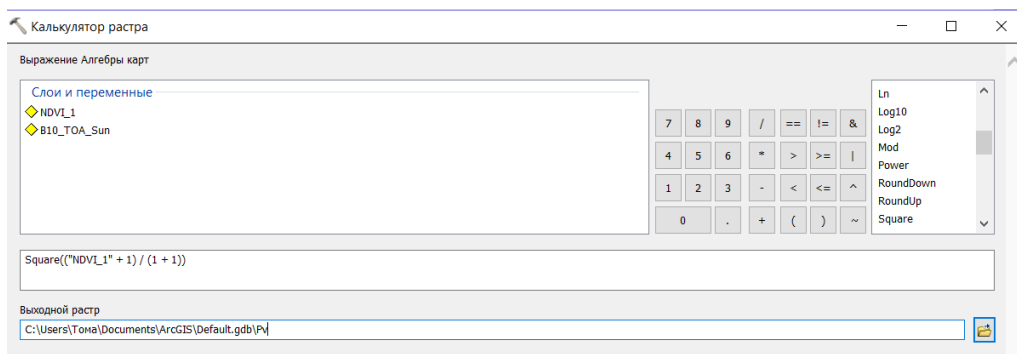


Рис. 5. Диалоговое окно калькулятора растра

5. *Определение радиояростной температуры земной поверхности по значениям теплового канала B10.* Радиояростная температура, под которой понимают интенсивность теплового излучения, испускаемого земной поверхностью и атмосферой (T , $^{\circ}C$), вычисляется по формуле (5):

$$T = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{R_2'} + 1)} - 273,15 \quad (5),$$

где: K_1 ($K1_CONSTANT_BAND_x$, где x – номер канала) и K_2 ($K2_CONSTANT_BAND_x$, где x – номер канала) – специфичные для канала постоянные теплового преобразования, значения которых содержатся в файле с метаданными $_MTL.txt$;

R_2' – ТОА планетарный коэффициент отражения, Вт/($m^2 * cр * мкм$).

Яростная температура излучения, падающего на установленный на борту космического летательного аппарата и направленного к Земле

радиометр, обусловлена излучением земной поверхности (суши или моря), восходящим излучением атмосферы и нисходящим излучением атмосферы, вторично рассеянного земной поверхностью.

Для выполнения расчетов используется калькулятор растра, в диалоговом окне которого в соответствующем поле прописывается выражение, как показано на рис. 6.

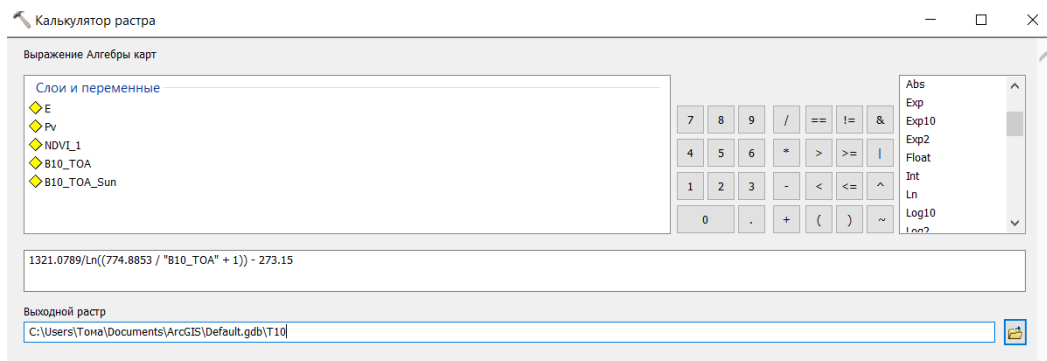


Рис. 6. Диалоговое окно калькулятора растра

6. *Выполнение расчета величины альbedo – отражающей способности земной поверхности (E).* Отражающая способность рассчитывается по формуле (6):

$$E = 0,004 * P_v + 0,986 \quad (6)$$

Альbedo определяется как часть (обычно в процентах либо долях единицы) энергии падающего света. Различают интегральное (энергетическое) альbedo – для всего потока радиации и спектральное – для отдельных участков спектра радиации.

Альbedo территории, покрытой древесной и травянистой растительностью, для видимого спектра колеблется от 0,02 до 0,5, а в инфракрасной области достигает 0,9. Альbedo снега составляет 0,5...0,9; песка – 0,29...0,34; водных поверхностей – 0,03...0,45; известняка – 0,38...0,56. Альbedo облаков составляет 0,60...0,90, а общее количество отраженной энергии составляет почти половину солнечной радиации, доходящей до земной атмосферы (интегральная альbedo Земли – 0,45...0,48).

Для выполнения расчетов используется калькулятор растра, в диалоговом окне которого в соответствующем поле прописывается выражение, как показано на рис. 7.

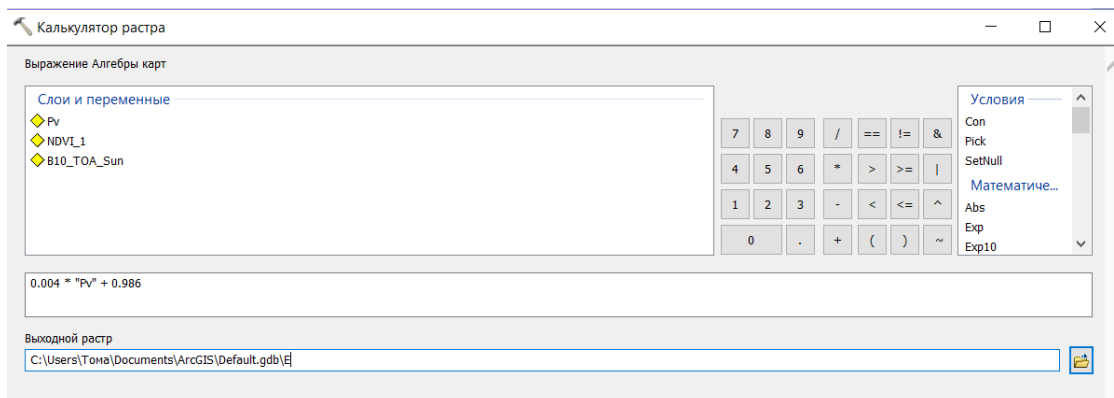


Рис. 7. Диалоговое окно калькулятора растра

7. Конвертирование радиояростной температуры земной поверхности в температуру земной поверхности, определенную в градусах Цельсия. Конвертирование данных выполняется по формуле (7):

$$LST = T / [1 + (\lambda * T / c2) * \ln(E)] \quad (7)$$

где: λ – длина волны, нм, для канала B10 значение составляет 10,8;

$c2 = h * c / s = 1,4388 * 10^{-2}$ мК = 14388 нК;

h – постоянная Планка = $6,626 * 10^{-34}$ Дж/с;

s – постоянная Больцмана = $1,38 * 10^{-23}$ Дж/К;

c – скорость света = $2,998 * 10^8$ м/с;

Для выполнения расчетов используется калькулятор растра, в диалоговом окне которого в соответствующем поле прописывается выражение, как показано на рис. 8.

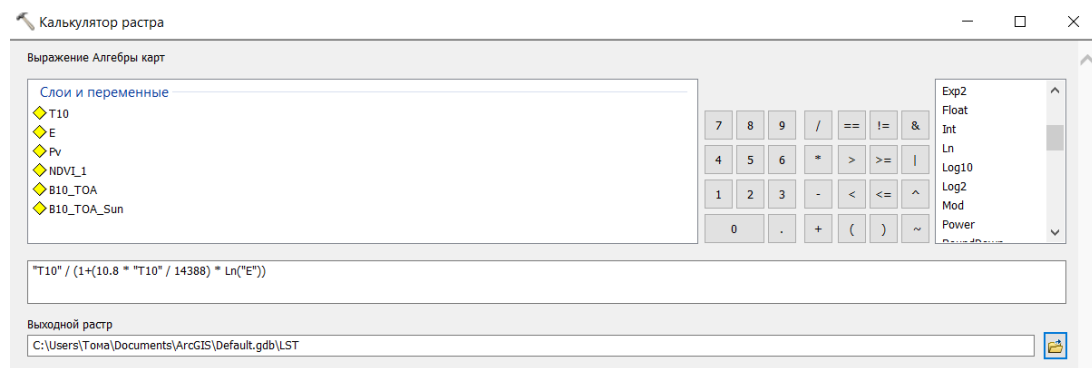


Рис. 8. Диалоговое окно калькулятора растра

После выполнения соответствующих настроек отображения полученное изображение примет следующий вид (рис. 9).

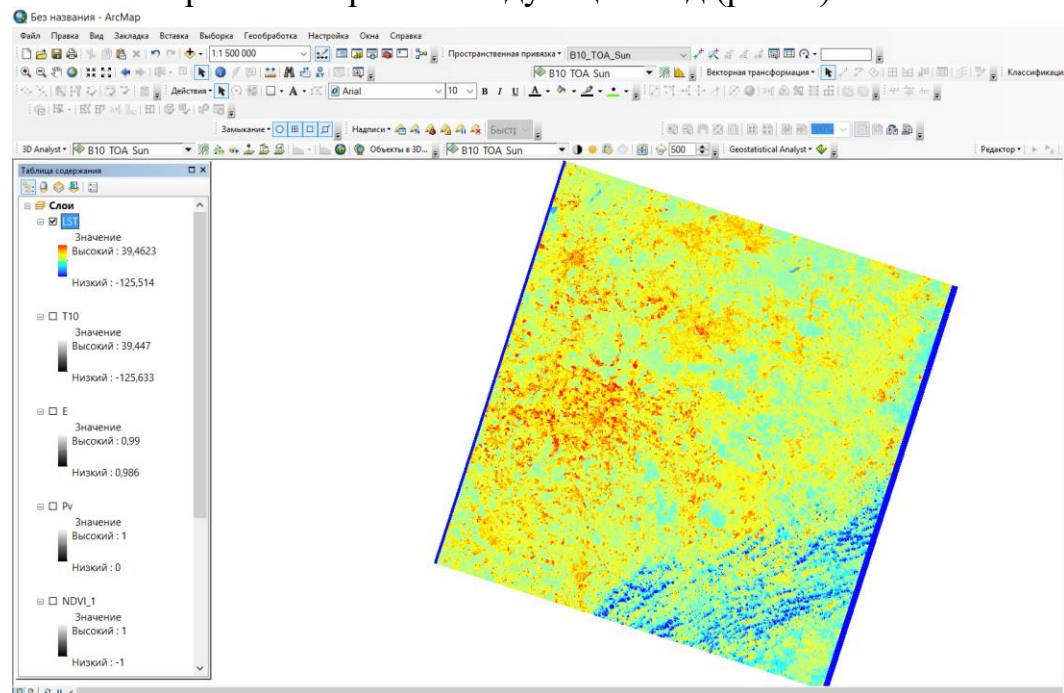


Рис. 9. Изображение, полученное по результатам вычисления температуры земной поверхности

Чтобы создать маску для части изображения и выполнить его вырезание следует очертить нужную область, нарисовав в ее пределах квадрат либо другую фигуру. Для этого в панели инструментов следует выбрать кнопку **Прямоугольник** (должна быть подключена панель инструментов Рисование) (рис. 10) и очертить нужную область (рис. 11).

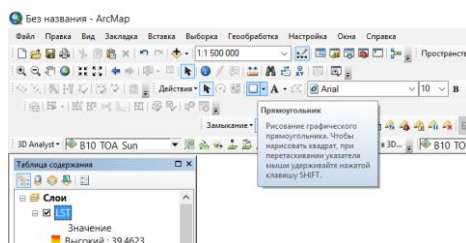


Рис. 10. Панель инструментов с кнопкой «Прямоугольник»

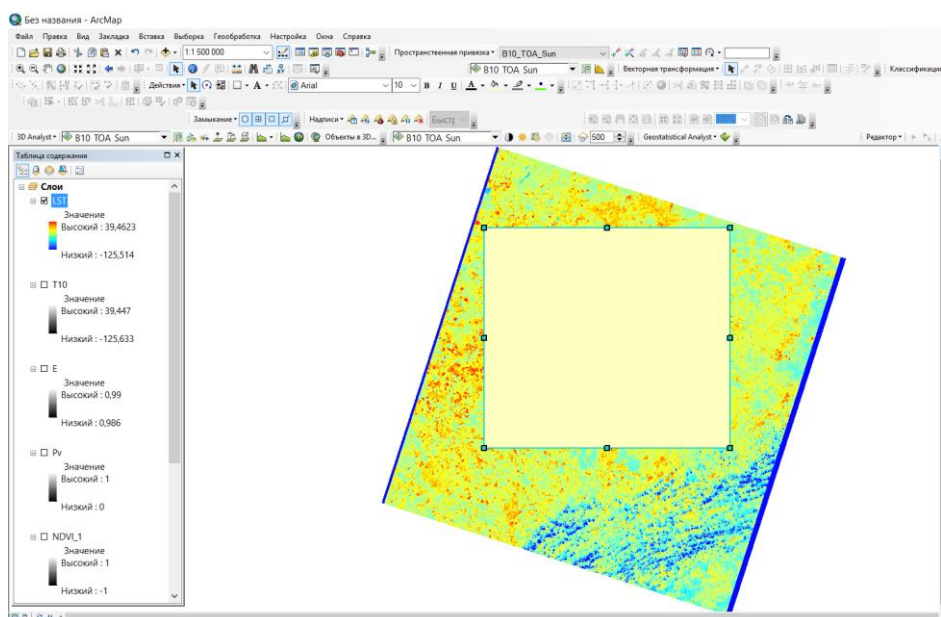


Рис. 11. Изображение с выделенной для вырезания областью

После очерчивания прямоугольника (либо области с иной конфигурацией), следует выбрать в выпадающем списке опции **Действие** пункт **Конвертировать графику в объекты** и выполнить соответствующие настройки, обязательно указав выполнение опции **Удалить графику после конвертации**.

Далее следует настроить отображение слоя с маской, выбрав опцию **Нет цвета** и изменив толщину и цвет контура.

После выполнения настроек отображения следует выбрать путь: **Инструменты Special Analyst – Извлечение – Извлечь по маске** и, задав соответствующие настройки, выполнить вырезание.

Вырезание по маске дает возможность получить реальные данные о температуре, поскольку отсекает экстремально низкие значения фона сцены и экстремально высокие значения рамки сцены. Так, до выполнения вырезания минимальная и максимальная температуры поверхности были

идентифицированы как 39,46 °С и -125,51 °С. После выполнения вырезания по маске максимальная и минимальная температуры поверхности в вырезанной области составили 35,74 °С и 9,16 °С, что соответствует реальным значениям, поскольку дата получения обрабатываемой сцены – 5 мая 2018 г. (рис. 12).

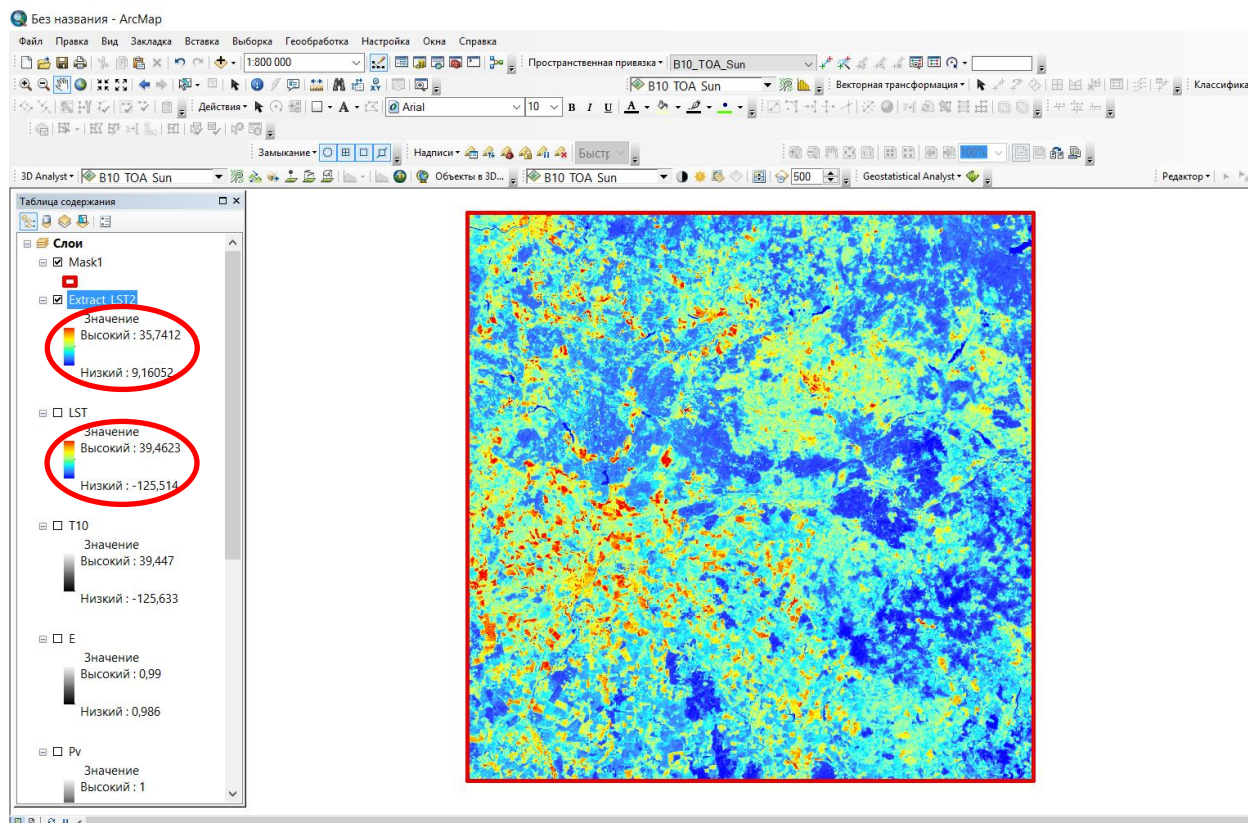


Рис. 12. Изображение с выделенной областью после обрезания по маске

ЛИТЕРАТУРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ:

1. Жиленев М. Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке / М. Ю. Жиленев // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 56–64.
2. Черепанов А. С. Вегетационные индексы / А. С. Черепанов // Геоматика. – 2011. – №2. – С. 98-102.
3. Миклашевич Т. С. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных / Т. С. Миклашевич, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 1. – С. 9–24.
4. Официальный сайт Геологической службы США. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov>.