

УДК 528.852+845:519.237.8:004.93

Я.И. Зельк, Л.В. Подгородецкая, С.В. Черный

**ОЦЕНИВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ
КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМНОГО ПОКРОВА
В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ***

Ключевые слова: термодинамическая температура земной поверхности, радиационная температура, температурный растр, коэффициент теплового излучения, классификация земного покрова, метод максимального правдоподобия, пожароопасные торфяники, фаза тления, фаза пламенного горения, Landsat-8 (OLI, TIRS).

**Проблема оценивания термодинамической температуры
земной поверхности по спутниковым данным**

Оценивание термодинамической температуры земной поверхности (ТЗП) по спутниковым данным дальнего инфракрасного диапазона с использованием данных видимого и ближнего инфракрасного диапазонов излучения является трудоемкой многоэтапной задачей и реализуется согласно таким этапам преобразования данных [1–12].

1. Выбор спутниковых изображений территорий в видимом, ближнем и дальнем инфракрасном диапазонах, охватывающих области интереса на земной поверхности в определенных интервалах дат, загрузка их в среду обработки и формирование множества обрабатываемых каналов.

2. Радиометрическая калибровка и пересчет цифровых значений пикселей в значения спектральной энергетической яркости у сенсора во всех диапазонах излучения.

3. Атмосферная коррекция методами различной сложности — в зависимости от необходимой точности оценивания температуры.

4. Пересчет цифровых значений пикселей оптического диапазона в спектральный коэффициент отражения (отражательную способность) земной поверхности.

5. Пересчет цифровых значений пикселей дальнего инфракрасного диапазона излучения в эффективную радиационную температуру у сенсора.

6. Определение коэффициента теплового излучения (излучательной способности) земной поверхности по наземным и спутниковым данным, в том числе с использованием данных нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и на основе классификации земного покрова.

* Исследования проведены в рамках Целевой программы научных исследований НАН Украины «Аэрокосмические наблюдения окружающей среды в интересах устойчивого развития и безопасности как национальный сегмент проекта Горизонт-2020 ERA-PLANET» (ERA-PLANET-UA).

7. Пересчет эффективной радиационной температуры у сенсора в температуру земной поверхности с использованием значений коэффициента теплового излучения.

8. Валидация по наземным измерениям оцененной по спутниковым данным температуры земной поверхности.

В общем случае задача дистанционного оценивания термодинамической температуры земной поверхности по данным дальнего инфракрасного диапазона является математически некорректной из-за неопределенности коэффициента теплового излучения земной поверхности и, в общем случае, взаимной зависимости температуры земной поверхности и коэффициента теплового излучения [1–3]. Разделение термодинамической температуры и коэффициента теплового излучения возможно лишь при наличии упрощающих допущений. Значительную сложность в решение задачи оценивания термодинамической температуры земной поверхности вносит необходимость повышения точности, учета поглощения и переизлучения в атмосфере излучения дальнего инфракрасного диапазона, а также шероховатости земной поверхности [1–3].

Среди множества известных методов определения температуры земной поверхности [1, 2, 4–7] наиболее распространенным классом методов с использованием известных (оцененных) коэффициентов теплового излучения являются одноканальные методы (Single-Channel Method), особенно в отношении космических систем с одним инфракрасным тепловым каналом серии Landsat. При реализации одноканального метода в этих космических системах осуществляется прямой пересчет спектральной плотности энергетической яркости в тепловом инфракрасном канале в эффективную радиационную температуру у сенсора путем обращения формулы закона теплового излучения Планка [1, 2, 6, 7]. Далее эффективная радиационная температура у сенсора пересчитывается в термодинамическую температуру земной поверхности с использованием значений коэффициента теплового излучения, который оценивается, в частности, на основе классификации земного покрова [6], для определенных классов покрова в соответствии с математической моделью [6, 8]. Каждому классу земного покрова, полученному в результате классификации на основе спектрального коэффициента отражения [6], который оценивается с использованием двухлучевых функций спектрального отражения, присваивается свое значение коэффициента теплового излучения в соответствии со схемой классификации, описанной в [9]. При реализации схемы классификации [9] спектральные коэффициенты отражения определяются с использованием двухлучевых функций спектрального отражения, адаптированных к изменению угла съемки спутниковой сенсорной системой.

Как было указано, один из конструктивных подходов к определению коэффициента теплового излучения основан на классификации земного покрова в оптическом диапазоне излучения [1, 6, 9, 10] с реализацией специальной схемы классификации [9]. Другой подход основан на получении оценок коэффициентов теплового излучения на основании оценок нормализованного вегетационного индекса земной поверхности (NDVI), который также имеет определенные границы интервалов значений для определенных классов земного покрова [1, 2, 5, 10, 11]. В [12] получены оценки коэффициента теплового излучения на пиксел для различных классов земного покрова на основе нормализованного дифференциального индекса влажности поверхности (NDMI), и с высокой точностью оценена температура земной поверхности по спутниковым данным с использованием таким образом определенной излучательной способности. В [10] проведен аналитический обзор указанных двух подходов к определению коэффициента теплового излучения земной поверхности и выполнено сравнение результатов оценивания температуры земной поверхности с использованием тепловой излучательной спо-

способности, определенной по результатам только классификации земного покрова, и на основе оценок NDVI. В [1, 10] отмечена близость оценок ТЗП, полученных в рамках указанных двух подходов. Из публикаций, посвященных оцениванию температуры земной поверхности на основе определения NDVI, отдельного внимания заслуживает работа [2], в которой предложена и валидирована методология двухпоточковой обработки спутниковых данных. Первый поток — обработка в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах: 1) для участков с полным или частичным растительным покровом — определения NDVI, через NDVI — проективного покрытия, а через проективное покрытие — коэффициента теплового излучения; 2) для искусственных поверхностей, открытых почв и других нерастительных покрытий — классификация земного покрова и использование для установления значений коэффициента теплового излучения, характерных для полученных классов значений тепловой излучательной способности, спектральной библиотеки EmissLib [2]. Второй поток — обработка данных в дальнем инфракрасном диапазоне излучения: спектральная плотность энергетической яркости на апертуре сенсора преобразуется в спектральную плотность земной поверхности с использованием найденного коэффициента теплового излучения, а последняя пересчитывается в термодинамическую температуру земной поверхности [2]. В [5] указано, что определение коэффициента теплового излучения только на основе классификации земного покрова может быть достаточно эффективным, если область спутниковой съемки достаточно хорошо изучена в плане представительства в ней участков известных классов земного покрова с известной (измеренной *in-situ*) тепловой излучательной способностью. В случае классификации земного покрова трудности могут возникать в установлении значений коэффициента теплового излучения сельскохозяйственных культур, поскольку их вегетационные характеристики относительно быстро изменяются во времени в период созревания [5]. Однако такого рода трудности возникают как при определении тепловой излучательной способности сельскохозяйственных культур на основе классификации, так и на основе NDVI, и решение этой проблемы лежит в необходимости проведения частых полевых измерений коэффициента теплового излучения и полевых и спутниковых измерений актуальных значений NDVI сельскохозяйственных культур в период созревания. В рассмотренных публикациях приводятся значения коэффициентов теплового излучения классов земного покрова, полученных на основе *in-situ* и спутниковых данных для различных территорий в различные интервалы времени: [101] — для шести классов на территории Alashtar City; [2] — для восьми классов на территории г. Киева на основе наземных измерений; [5] — для шести классов; [11] — для шести классов на территории г. Дели по данным Landsat-7 ETM+ с указанием доверительных интервалов принадлежности для каждого класса, средних значений и среднеквадратических отклонений; [12] — для пяти классов на территории г. Дели с указанием доверительных интервалов принадлежности для каждого класса.

Таким образом, оценивание температуры земной поверхности с использованием коэффициента теплового излучения, установленного на основе классификации земного покрова для каждого класса, обладает, в общем, меньшей точностью, чем с использованием излучательной способности каждого пиксела покрова, рассчитанного по NDVI. Однако восстановление термодинамической температуры поверхности земли на основе классификации земного покрова можно считать оправданным на этапе предварительной оценки указанной температуры, особенно в случаях, если имеются детальные карты классификации земного покрова высокого пространственного разрешения исследуемой территории.

В Украине систематические научные исследования состояния пожароопасных торфяников с помощью дистанционных методов, основанных на использовании данных спутниковых наблюдений земной поверхности с повышенным пространственным разрешением и результатов полевой тепловизионной съемки, проводятся в Центре аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины [13, 14]. Рассматриваются возможности использования тепловых каналов систем спутниковой съемки для определения температурных показателей поверхности торфяников для выявления перегретых участков и очагов пожаров. С помощью полевой тепловизионной съемки контролируется качество противопожарных мероприятий и выявляются скрытые подземные очаги горения торфа на участках, где тушения уже проведены. Для выявления пожароопасных участков на торфяниках дополнительно привлекается информация о местонахождении торфяников, мощности залежей торфа, погоднo-климатические показатели. Данные спутниковых изображений обрабатываются в ручном режиме в стандартных GIS-пакетах и средах.

Цель работы — исследование метода оценивания поля термодинамической температуры земной поверхности по спутниковым данным длинноволнового инфракрасного диапазона на основе классификации земного покрова по данным оптического диапазона излучения с реализацией методов машинного обучения.

Метод реализован в среде Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) [15], который является свободным инструментальным программным средством с открытым кодом для Quantum GIS (QGIS) [16] и позволяет осуществлять полуавтоматическую классификацию многоспектральных спутниковых изображений, содержит средства предварительной пакетной обработки (в частности, атмосферной коррекции) данных многоспектральных каналов, постобработки и расчета растровых и векторных изображений различного тематического направления.

Результаты исследований проиллюстрированы на примере оценивания поля термодинамической температуры поверхности болотных минеральных и торфяных почв низинных местностей Киевской области по данным спутниковых изображений Landsat-8 (OLI, TIRS) и доложены на шестой Украинской конференции «GEO-UA» [17].

Этапы обработки данных Landsat-8 (OLI, TIRS) и направления исследований

Выбор спутниковых изображений территорий, охватывающих территории болотных минеральных и торфяных грунтов низинных местностей Киевской области в определенных интервалах дат сообщений о торфяных пожарах. Загрузка данных спектральных каналов в среду SCP: 2 — синий, 3 — зеленый, 4 — красный, 5 — ближний инфракрасный, 6 — коротковолновой инфракрасный I, 7 — коротковолновой инфракрасный II и 10 — тепловой инфракрасный. Формирование множества совместно обрабатываемых каналов 2–7 оптического диапазона для классификации земного покрова и установления коэффициента теплового излучения для найденных классов.

Предварительная обработка изображений. Преобразование цифровых значений пикселей Q_{cal} уровня обработки 1 в каждом канале 2–7, 10 в спектральную плотность энергетической яркости L_λ на апертуре сенсора согласно уравнению [7, 15]

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L, \quad (1)$$

где M_L — калибровочный коэффициент усиления, A_L — калибровочный коэффициент смещения, выбираемые из файла метаданных снимка.

Для пересчета значений спектральной плотности энергетической яркости L_λ в коэффициент спектрального отражения земной поверхности ρ для каналов 2–7 сенсора Landsat-8 OLI производится атмосферная коррекция изображений по методу вычитания темного объекта (Dark Object Subtraction (DOS) [5, 15, 18, 19], в частности DOS1) на основе относительных характеристик яркости конкретного спутникового изображения. DOS-атмосферная коррекция базируется на определении спектральной энергетической яркости L_p части излучения, приходящего к спутниковому сенсору, которая вызвана лишь рассеянием в атмосфере, и приближенно определяется по конкретному снимку как вклад в яркость изображения темных объектов с учетом допущений [5, 15, 18, 19] следующим образом:

$$L_p = M_L * DN_{\min} + A_L - 0,01 * ESUN_\lambda * \cos \theta_S / (\pi d^2), \quad (2)$$

где DN_{\min} — цифровое значение пиксела (соответствующее значению спектральной энергетической яркости L_{\min}), для которого сумма всех пикселов с цифровыми значениями, не большими, чем указанная величина, составляет 0,01 от общего количества пикселов всего изображения; $ESUN_\lambda$ — средний экзосферный поток солнечного излучения, рассчитываемый для сенсора Landsat-8 через параметры, содержащиеся в файле метаданных снимка; θ_S — угол зенита Солнца в градусах, рассчитываемый через угол высоты Солнца; d — расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах, которое содержится в файле метаданных снимка [6, 15].

На основании спектральных плотностей энергетических яркостей L_λ и L_p , рассчитанных согласно (1) и (2), для каналов 2–7 сенсора Landsat-8 OLI определяется спектральный коэффициент отражения земной поверхности ρ следующим образом [5, 15]:

$$\rho = \pi * (L_\lambda - L_p) * d^2 / (ESUN_\lambda * \cos \theta_S). \quad (3)$$

Пересчет спектральной плотности энергетической яркости на апертуре сенсора в тепловом инфракрасном канале в эффективную радиационную температуру у сенсора. В космических системах серии Landsat осуществляется прямой пересчет спектральной плотности энергетической яркости L_λ в тепловом инфракрасном канале в эффективную радиационную температуру у сенсора T_B в градусах Кельвина путем обращения формулы закона теплового излучения Планка [1, 2, 6, 7]. В частности, для теплового инфракрасного канала 10 Landsat-8 TIRS имеет место соотношение [7]

$$T_B = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1), \quad (4)$$

где K_1 и K_2 — TIRS-термальные постоянные, содержащиеся в файле метаданных спутникового снимка, L_λ — спектральная энергетическая яркость, определяемая согласно (1) для канала 10. Создается растр эффективной радиационной температуры у сенсора.

Создание обучающих выборок данных из ROI (Region-of-Interest) для контролируемой классификации. Используя методологию из [15], определяется четыре основных макрокласса земного покрова (пятый класс — неклассифицированные области), которым присваиваются определенные идентификаторы ID — номера макроклассов: неклассифицированные области (unclassified) — 0; вода (water) — 1; застройка (built-up) — 2; растительность (vegetation) — 3; открытый

грунт (bare soil) — 4. Макроклас — это группа ROI, которая может содержать несколько классов, каждый из которых обладает своей спектральной сигнатурой, от значений спектрального коэффициента отражения, но спектральные сигнатуры классов в рамках одного макрокласа обладают определенной мерой близости в терминах некоторой введенной дискриминантной функции [20]. Так, к макрокласу вода (water) — 1 могут принадлежать такие классы земного покрова: вода в природных водоемах — реках и озерах, вода на водно-болотных угодьях, морская вода. К макрокласу застройка (built-up) — 2 могут принадлежать такие классы земного покрова: большие высотные строения, магистральные широкие дороги и большие площади, невысокие строения частного сектора с узкими дорогами и приусадебными садами.

ROI (обучающие области) создаются в среде Semi-Automatic Classification Plugin на основе фотоинтерпретации псевдоцветных композитов данных каналов оптического диапазона 2–7 сенсора Landsat-8 OLI с использованием методологии полуавтоматического оконтуривания участков полигонами или расширения областей для макрокласов земного покрова [15]. Для каждого макрокласа земного покрова создается по несколько обучающих областей, каждая из которых определяет некоторый класс, принадлежащий макрокласу. Классы определенного макрокласа земного покрова, которые соответствуют различным участкам на псевдоцветном композитном спутниковом изображении, могут повторяться. Процедура наращивания области позволяет формировать обучающую область путем присоединения к некоторому выбранному пикселу-семени соседних пикселов с учетом сходства на основе близости векторов их спектральных сигнатур. Близость характеризуется таким параметром, как расстояние между векторами спектральных сигнатур [20], в частности Евклидово, по установленному значению которого определяется принадлежность анализируемого пиксела к обучающей области. Указанное расстояние вычисляется по всем спектральным каналам оптического диапазона излучения. Задается минимальная мощность области в количестве пикселов, которое является ограничением снизу при определении пикселов, которые должны принадлежать области. Задается также максимальная ширина области в количестве пикселов, которая равна стороне квадрата с центром в пикселе-семени, в который должна быть вписана обучающая область.

Контролируемая классификация земного покрова по пакетно-обрезанным растрам спектрального коэффициента отражения из множества оптических каналов 2–7 Landsat-8 OLI по методу максимального правдоподобия [15, 20]. Для определения принадлежности пиксела с вектором спектральной сигнатуры x к макрокласу земного покрова C_k используется дискриминантная функция $g_k(x)$:

$$g_k(x) = \ln p(C_k) - \frac{1}{2} \ln \left| \Sigma_k \right| - \frac{1}{2} (x - y_k)^t \Sigma_k^{-1} (x - y_k), \quad (5)$$

где $p(C_k)$ — вероятность того, что класс C_k верный, Σ_k — матрица ковариации данных в классе C_k с определителем $\left| \Sigma_k \right|$, y_k — вектор спектральной сигнатуры, характеризующий класс C_k .

С учетом вида (5) условие принадлежности пиксела с вектором спектральной сигнатуры x к макрокласу земного покрова C_k определяется следующим образом:

$$x \in C_k \Leftrightarrow g_k(x) > g_j(x) \forall k \neq j \text{ and } g_k(x) > T_i, \quad (6)$$

где T_i — пороговая величина для исключения из классификации пикселов со значением дискриминантной функции ниже этой величины. На основании реализации процедуры классификации (5), (6) создается растр классификации земного покрова.

Определение коэффициентов теплового излучения (thermal emissivity) участков земной поверхности на основе классификации земного покрова. Производится реклассификация полученного растра классификации земного покрова с присваиванием четырем макроклассам вместо ID определенных значений коэффициента теплового излучения, оцененных ранее на основе in-situ и спутниковых данных. Следуя методологии, изложенной в [15], реклассификация четырех макроклассов земного покрова к значениям коэффициента теплового излучения e выполняется следующим образом: вода (water) — $e = 0,98$; застройка (built-up) — $e = 0,94$; растительность (vegetation) — $e = 0,98$; открытый грунт (bare soil) — $e = 0,93$. По результатам реклассификации строится растр коэффициентов теплового излучения четырех макроклассов земного покрова [15].

**Пересчет эффективной яркостной температуры у сенсора
в термодинамическую температуру земной поверхности
с использованием значений коэффициента теплового излучения**

Эффективная радиационная температура у сенсора T_B пересчитывается в термодинамическую температуру земной поверхности T с использованием значений коэффициента теплового излучения e для определенных классов земного покрова в соответствии с математической моделью [6, 8, 15]

$$T = T_B / [1 + (\lambda * T_B / c_2) * \ln(e)], \quad (7)$$

где константа $c_2 = 14388 \mu m K$, а для канала 10 Landsat-8 TIRS $\lambda = 10,8 \mu m$. На основании (7) строится растр поля термодинамической температуры земной поверхности.

Создание векторного слоя болотных минеральных и торфяных почв низинных местностей для Киевской области на основе актуальных карт почв Украины (в частности, карт Национального научного центра «Институт почвоведения и агрохимии имени О.Н. Соколовского») и данных цифровой модели рельефа.

Создание векторного слоя населенных пунктов Киевской области, возле которых зафиксированы торфяные пожары в пределах указанных почв по данным Государственной службы Украины по чрезвычайным ситуациям, с атрибутивной информацией о местах и датах пожаров.

Результаты исследований

Контролируемая классификация земного покрова осуществлялась по пакетно обрезанным растрам множества оптических каналов Landsat-8 на основе созданных в полуавтоматическом режиме ROI, которые, в свою очередь, были построены по псевдоцветным композитам данных каналов. На рис. 1 и 2 показаны растры псевдоцветных композита (5–4–3) снимка от 5.08.2016 и композита (4–3–2) снимка от 15.10.2015 соответственно атмосферно скорректированных данных оптических каналов Landsat-8. На фоне указанных растров на рис. 1, 2 отображены векторный слой болотных минеральных и торфяных почв низинных местностей и векторный слой населенных пунктов Киевской области в пределах указанных почв.

На рис. 3 и 4 представлены обучающие ROI в макроклассах земного покрова вода (water: 1 — озеро, окруженное застройкой (built-up); 2 — на фоне псевдоцветного композита (5-4-3) и температурного растра (15.10.2015) соответственно в окрестностях г. Березань, построенные методом расширения областей [15]. Из рис. 4 видно, что различные классы земного покрова имеют свою характерную излучательную способность.

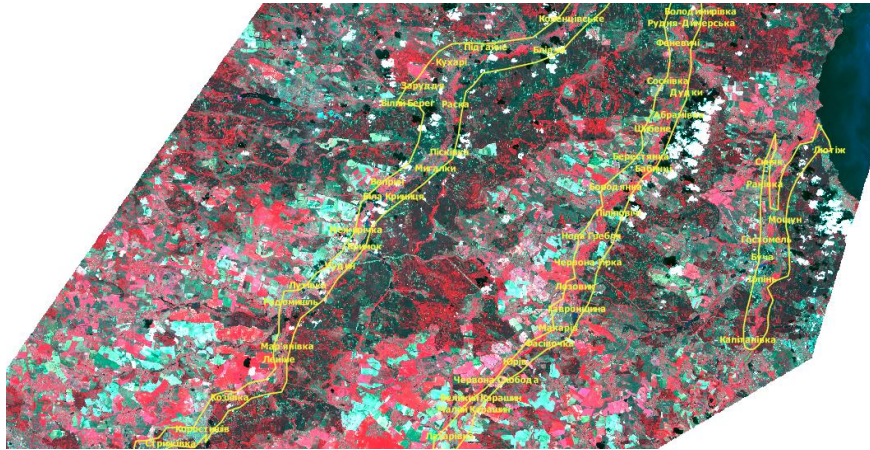


Рис. 1

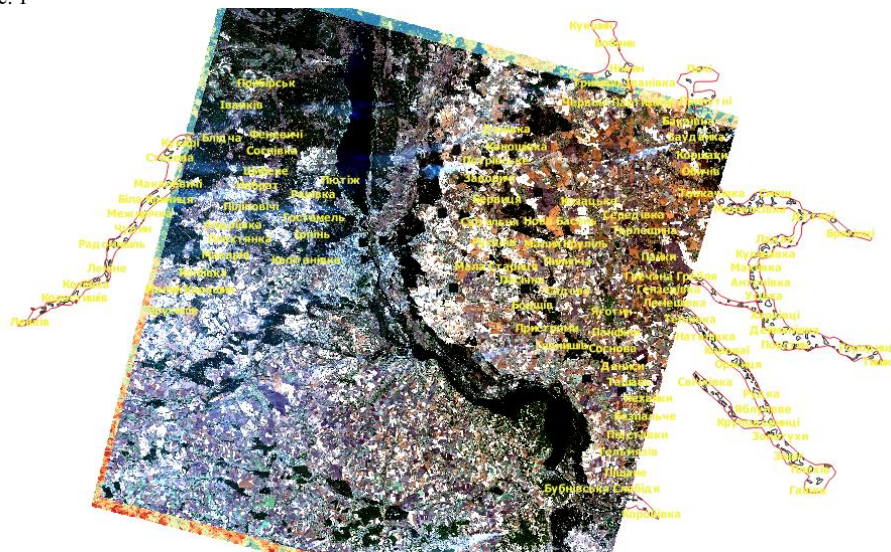


Рис. 2

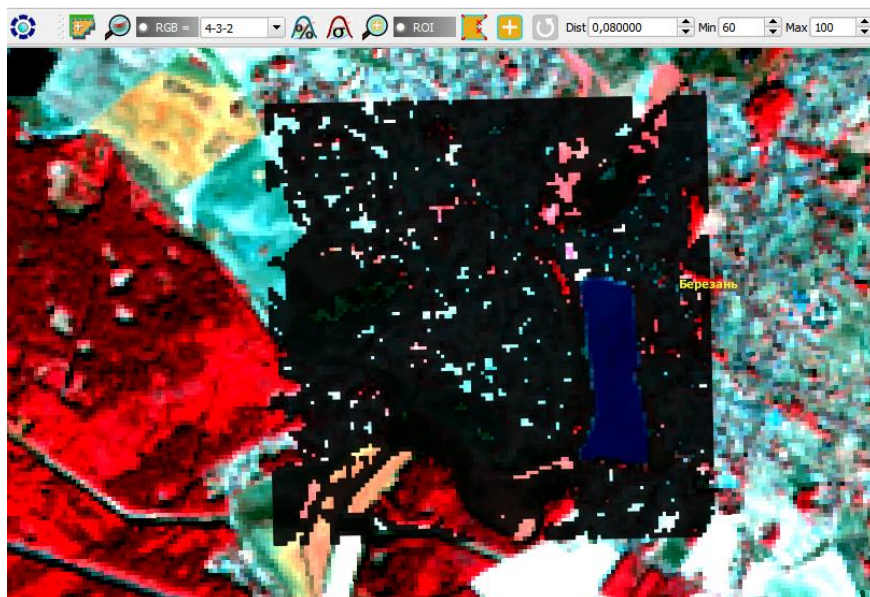


Рис. 3

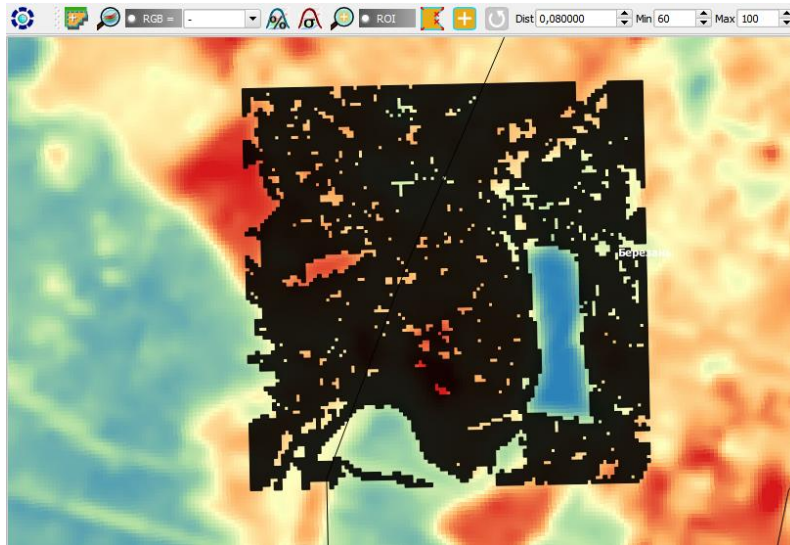


Рис. 4

На рис. 5 изображен растр классификации земного покрова на четыре основных макрокласса методом максимального правдоподобия [15, 20], полученный на основе изображения Landsat-8 (05.08.2016) (псевдоцветной композит которого отображен на рис. 1) по обучающей выборке созданных ROI с указанием легенды представления классов. Класс 0 — неклассифицированные области (unclassified). Неклассифицированные пиксели практически отсутствуют.

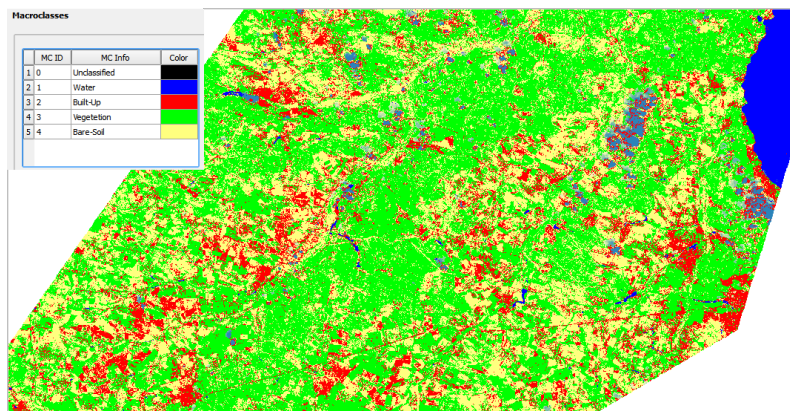


Рис. 5

На рис. 6 отображен растр коэффициента теплового излучения земной поверхности (05.08.2016), полученный на основе реклассификации растра классификации (см. рис. 5) с использованием таблицы соответствия между классами земного покрова и коэффициентом теплового излучения [15].

На рис. 7 приведен растр поля термодинамической температуры земной поверхности (15.10.2015), полученный в среде Semi-Automatic Classification Plugin в результате пересчета эффективной радиационной температуры у сенсора с использованием растра коэффициента теплового излучения (см. рис. 6) в соответствии с математической моделью [6, 8, 15].

Таблица

| Макрокласс земного покрова | Коэффициент теплового излучения |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Вода (water) | 0,98 |
| Застройка (built-up) | 0,94 |
| Растительность (vegetation) | 0,98 |
| Открытый грунт (bare soil) | 0,93 |

К тому же, возможно «насыщение» аналого-цифрового преобразователя (АЦП) канала B10 Landsat 8 TIRS, если цифровые значения пикселей в канале B10 достигают значения $DN_{10} = 2^{16} - 1 = 65535$. Поэтому по данным канала B10 Landsat 8 TIRS можно оценивать только температуру фазы тления торфяников, не превышающей температуры, вызывающей насыщение АЦП канала B10. Последний факт зафиксирован по построенным растрам поля термодинамической температуры земной поверхности от 15.10.2015, фрагмент которого показан на рис. 9. Фрагмент растра поля термодинамической температуры земной поверхности от 15.10.2015 на рис. 9 содержит объект с термодинамической температурой $T_{surf} = 102,4^{\circ}C = 375,55K$ (район с. Озерное Киевской обл.). При этом $DN_{10} = 65535$, эффективная радиационная температура у спутникового сенсора составляет $T_{brith} = 94,88^{\circ}C$ и имеет место насыщение АЦП канала B10 Landsat 8 TIRS. Реальная же термодинамическая температура земной поверхности может оказаться и выше, чем $T_{surf} = 102,4^{\circ}C = 375,55K$, и, кроме фазы тления, может иметь место еще и фаза субпиксельного пламенного горения на объекте. На рис. 10 показан фрагмент псевдоцветного композита 4–3–2 (15.10.2015) данных оптических каналов Landsat 8 OLI и видно, что с объектом высокой термодинамической температуры, отраженным на рис. 9, связан дым, выходящий из узкого рубца на объекте, однако пламени не видно. Этот факт свидетельствует о том, что на указанном объекте имеет место фаза тления, а если и присутствует фаза горения, то она имеет субпиксельный масштаб.

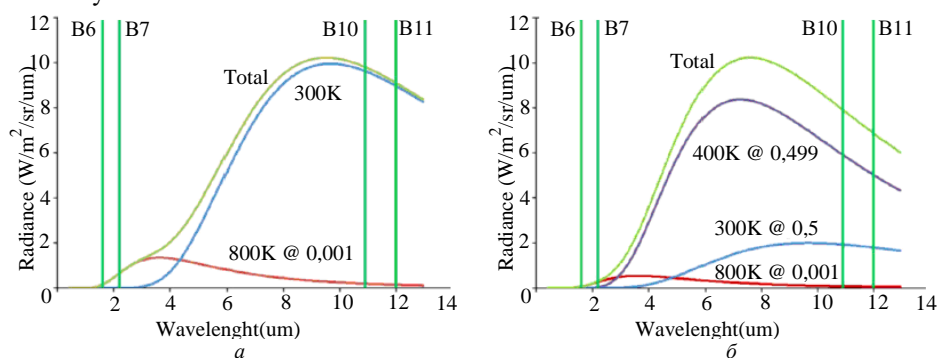


Рис. 8



Рис. 9

Контуры участков земной поверхности, полученные из условий превышения экспериментально установленных пороговых значений термодинамической температуры по построенным температурным растрам, показанным на рис. 7, согласуются с информацией о населенных пунктах и датах пожаров на торфяниках, полученной по данным Государственной службы Украины по чрезвычайным ситуациям. На рис. 11 отображены нагретые участки с $T_{surf} > 23^{\circ}C$ (темно-серые) в температурном растре земной поверхности (15.10.2015). Они в значительном большинстве располагаются в пределах болотных минеральных и торфяных грунтов низинных местностей и в большинстве случаев находятся вблизи населенных пунктов (темные полигоны), присутствующих в сводках Государственной службы Украины по чрезвычайным ситуациям о пожарах на торфяниках 15.10.2015. Другие населенные пункты обозначены светлыми полигонами.

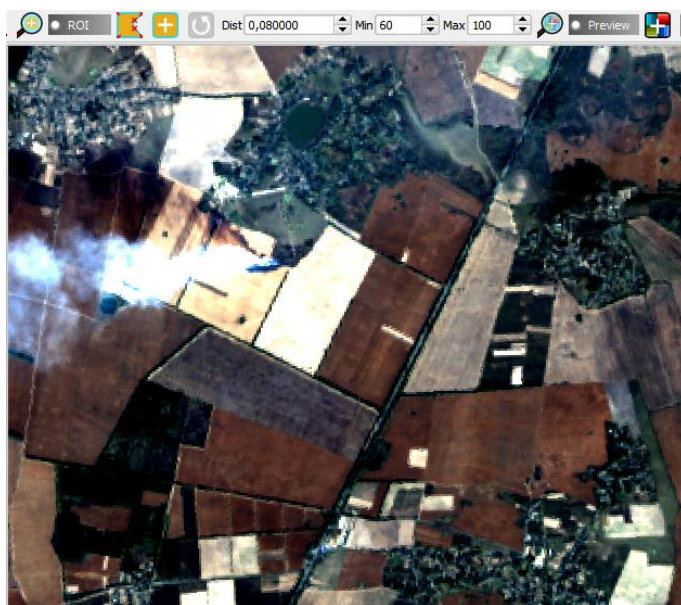


Рис. 10

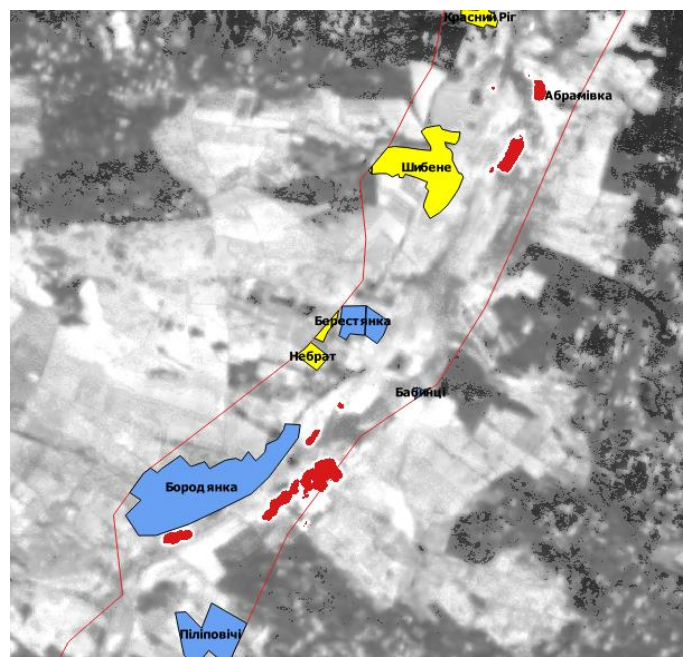


Рис. 11

Заключення

Кроме значительного периода повторной съемки участка земной поверхности — 16 суток, многоспектральные данные Landsat-8 TIRS имеют то существенное ограничение, что позволяют оценивать только фазу тления торфяников. Верхний предел эффективной радиационной температуры у сенсора по данным теплового инфракрасного канала B10 (11 мкм) из-за насыщения его АЦП составляет $T_{brith_max} = 94,88^{\circ}C = 368K$. Данные коротковолновых инфракрасных каналов B6 (1,6 мкм), B7 (2,2 мкм) могут использоваться для выявления очагов открытого пламени только на основе ночных спутниковых изображений Landsat-8 OLI, которые встречаются редко.

Из-за субпиксельных размеров очагов пламени на торфяниках в пределах участков фазы тления значительных размеров использование традиционных пороговых алгоритмов обнаружения открытого пламени по данным спутниковых сенсоров AVHRR и MODIS при километровом пространственном различии нельзя считать эффективным применительно к торфяникам.

Альтернативой в оценке фаз тления и пламенного горения торфяников является повышение пространственного разрешения изображений тепловых полей на основе метода, который разрабатывается авторами, и заключается в сочетании многоспектральных данных от сенсоров различной природы различных спутниковых миссий и использовании регрессионных моделей для слияния этих разнородных данных и их обработке методами машинного обучения [21, 22]. При этом невысокое пространственное разрешение изображений поля термодинамической температуры земной поверхности от спутниковых сенсоров с высокой частотой повторной съемки может быть существенно повышено за счет слияния с данными сенсора со средним пространственным разрешением изображений теплового поля, в частности Landsat-8 TIRS, обладающих, однако, низкой частотой повторной съемки.

Кроме того, в отношении пожароопасных торфяников следует развивать сети наземных дистанционных сенсоров измерений температуры, влажности, других метеорологических показателей и применять инфракрасную съемку высокого пространственного разрешения с беспилотных летательных аппаратов, в частности на основе опыта такого рода государственных проектов в Индонезии.

Дальнейшие научные исследования целесообразно сосредоточить на совершенствовании и применении разрабатываемого метода повышения пространственного разрешения изображений тепловых полей [21, 22], процедур идентификации дыма на основе методов классификации, оценке регионального индекса угроз пожаров на торфяниках, который зависит, в частности, от интегральной за некоторый период времени разности количества осадков и эвапотранспирации суши, водных структур, растений.

Я.І. Зелик, Л.В. Підгородецька, С.В. Чорний

ОЦІНЮВАННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ В ОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Досліджено та реалізовано у середовищі Quantum GIS з використанням Semi-Automatic Classification Plugin метод оцінювання поля термодинамічної температури земної поверхні за супутниковими даними довгохвильового інфрачервоного діапазону на основі класифікації земного покриву в оптичному діапазоні випромінювання із застосуванням машинного навчання. Здійснено контро-

льовану класифікацію земного покриву на чотири основних макрокласи методом максимальної правдоподібності за відбивною здатністю для сформованої множини даних спектральних каналів оптичного діапазону випромінювання. При класифікації для кожного макрокласу створено по декілька навчальних областей, кожна з яких визначає певний дочірній клас. Навчальні області сформовані методом їх розширення шляхом приєднання до деякого обраного піксел-насіни сусідніх пікселів на основі близькості векторів їх спектральних сигнатур. Проведено рекласифікацію отриманого класифікаційного растра, і кожному макрокласу присвоєно характерне відоме значення коефіцієнта теплового випромінювання. Результати досліджень проілюстровано на прикладі оцінювання поля термодинамічної температури поверхні болотних мінеральних і торфових ґрунтів низинних місцевостей Київської області за даними супутникових зображень Landsat-8 (OLI, TIRS). Встановлено, що контури нагрітих ділянок місцевості, отримані з умов перевищення експериментально підібраних порогових значень термодинамічної температури за побудованим температурним растром земної поверхні, узгоджуються з інформацією Державної служби України з надзвичайних ситуацій про дати і місця пожеж на торфовищах.

Ключові слова: термодинамічна температура земної поверхні, яскравісна (радіаційна температура), температурний растр, коефіцієнт теплового випромінювання, класифікація земного покриву, метод максимальної правдоподібності, пожежонебезпечні торфовища, фаза тління, фаза полум'яного горіння, Landsat-8 (OLI, TIRS)

Ya.I. Zyelyk, L.V. Podgorodetskaya, S.V. Chornyuy

ESTIMATION OF THE THERMODYNAMIC TEMPERATURE OF THE LAND SURFACE USING SATELLITE DATA BASED ON THE LAND COVER CLASSIFICATION IN THE OPTICAL RADIATION RANGE

The method for estimation of the thermodynamic temperature field of the land surface using satellite data of the long-wave infrared range is studied and implemented in the environment of Quantum GIS using the Semi-Automatic Classification Plugin. This method is based on the land cover classification in the optical radiation range using the machine learning. The supervised land cover classification into four main macroclasses was carried out using the maximum likelihood method according to the reflectivity for the formed data set of spectral channels in the optical radiation range. When classifying, for each macroclass several training areas are created, each of which defines the certain child class. Training regions are formed by region growing method by attaching adjacent pixels to some selected pixel-seed based on the proximity of their spectral signature vectors. The reclassification of the resulting classification raster was performed, and for each macroclass the characteristic known value of the thermal emissivity was assigned. The research results are illustrated by the example of the estimation of the surface thermodynamic temperature of the wetland mineral and peat soils in the lowlands of the Kyiv region using satellite images of Landsat-8 (OLI, TIRS). It has been established that the contours of heated terrain areas, obtained from the conditions of exceeding of the experimentally selected threshold values of the thermodynamic temperature, based on the constructed temperature raster of the land surface, are consistent with the information of the State Emergency Service of Ukraine about dates and places of the peatland fires.

Keywords: thermodynamic temperature of the land surface, brightness temperature, temperature raster, thermal emissivity, land cover classification, maximum likelihood method, fire hazardous peat lands, smoldering phase, flaming phase, Landsat-8 (OLI, TIRS)

1. Alipour T., Sarajian M.R., Esmaseily A. Land surface temperature estimation from thermal band of LANDSAT sensor, case study: Alashtar city. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **XXXVIII-4/C7**, 2004. 6 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/215444122_Land_surface_temperature_estimation_from_thermal_band_of_landsat_sensor_case_study_Alashtar_City (01.02.2019).
2. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съемки. С.А. Стан-

- кевич, В.Е. Филиппович, Н.С. Лубский и др. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2015. №7. С. 12–21. URL: <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77> (01.02.2019). 1164 p.
3. Yu X., Guo X., Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS — comparison between radiative transfer equation based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*. 2014. **6**, N. 10. P. 9829–9852.
 4. Sobrino J., Jiménez-Muñoz J.C. & Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment, Elsevier*. 2004. **90**. P. 434–440.
 5. Weng Q., Lu D. & Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment, Elsevier* 2004. **89**. P. 467–483 p.
 6. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product> (01.02.2019).
 7. Artis D.A., & Carnahan W.H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*. 1982. **12**, P. 313–329.
 8. Snyder W.C., Wan Z., Zhang Y., & Feng Y.–Z. Classification based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*. 1998. **19**. P. 2753–2774.
 9. Perez Hoyos I.C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*. 2014. **2**. N 2. P. 26–30.
 10. Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+. J. Mallick, Y. Kant, B.D. Bharath *J. Ind. Geophys. Union*. 2008. **12**. N. 3. P. 131–140.
 11. Mallick J., Singh C.K., Shashtri S., Rahman A. & Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. **19**. P. 348–358.
 12. Ліщенко Л.П., Пазинич Н.В. Моніторинг стану торфовищ для виявлення пожежонебезпечних ділянок за допомогою дистанційних методів *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2016. № 8. С. 29–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/72/89> (01.02.2017).
 13. Дослідження та моніторинг пожежонебезпечних торфовищ на основі матеріалів дистанційного зондування Землі. Н.В. Пазинич, Л.П. Ліщенко, Г.Б. Крилова, В.С. Філіпович, М.С. Лубський. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1. С. 88–94.
 14. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. URL: <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/#> (01.11.2018).
 15. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System. — URL: <https://www.qgis.org/en/site/> (01.02.2019)).
 16. Zyelyk Ya.I., Pidgorodetska L.V., Chornyy S.V. Techniques of land surface temperature estimation in semi-automatic classification plugin and its application for monitoring of firehazardous peatlands. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. Матеріали шостої української конференції «GEO-UA»* (Україна, Київ, 18–19 вересня 2018 р.). Київ : ФОП Вероцький С.В., 2018. С. 53–54.
 17. Chavez P.S. Image-based atmospheric correction —revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1996. **62**(9). P. 1025–1036.
 18. Moran M., Jackson R., Slater P. & Teillet P. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*. 1992. **41**. P. 169–184.
 19. Richards J.A. and Jia X. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Berlin, Germany: Springer, 2006. 439 p.
 20. Long-wave infrared identification of smoldering peat fires in Indonesia with nighttime Landsat data Christopher D Elvidge, Mikhail Zhizhin, Feng-Chi Hsu, Kimberly Baugh, M Rokhis Khomarudin, Yenni Vetrira, Parwati Sofan, Suwarsono and Dadang Hilman. *Environ. Res. Lett.* 2015. **10**. 12 p. Doi:10.1088/1748-9326/10/6/06502.
 21. Zyelyk Ya., Chornyy S., Pidgorodetska L. Mathematical models of the joint calibration process and optimal filtration of integrated multispectral data products of space earth observations in visible, thermal and radio spectral bands. *Abstracts of the 17th Ukrainian Conference on Space Research*. Odesa, August 21–25, 2017. Kyiv : SRI, NAS and SSA of Ukraine. 2017. P. 195.
 22. Чорний С.В., Зелик Я.І., Підгородецька Л.В. Метод підвищення просторового розрізнення зображень теплових полів на основі поєднання багатоспектральних даних. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. Матеріали шостої української конференції «GEO-UA»*. Київ, 18–19 вересня 2018. С. 49–50.

Получено 19.03.19