

Коррекция тепловых изображений со спутников Landsat при изучении трансформаций тундровых ландшафтов на примере района Уренгойского НГКМ

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Аннотация. Разработана методика относительной радиометрической коррекции тепловых изображений со спутников Landsat для количественной оценки изменений температуры поверхности тундровых ландшафтов. Отличительная особенность методики состоит в применении алгоритма неконтролируемой классификации для определения псевдоинвариантных областей с идентичными спектральными характеристиками опорного и корректируемого тепловых изображений. Минимизация погрешности коррекции температурных контрастов осуществляется путем итеративного определения оптимального количества классов и коэффициентов линейной регрессии по методу кросс-валидации. Предлагаемая методика позволяет в 2–5 раз снизить погрешности при коррекции, что в целом свидетельствует о ее эффективности. В условиях проведенного эксперимента абсолютная погрешность коррекции, соответствующая пороговой чувствительности тепловых изображений (0,4 К), может быть достигнута для температурных контрастов менее 3 °С.

Ключевые слова: космические снимки, коррекция, температурный контраст, тепловое изображение, тундровый ландшафт.

Для цитирования: Корниенко С.Г. Коррекция тепловых изображений со спутников Landsat при изучении трансформаций тундровых ландшафтов на примере района Уренгойского НГКМ // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art17>

Введение

Освоение нефтегазовых месторождений российских территорий Арктики и Субарктики предполагает решение широкого круга задач по обеспечению безопасности технических объектов, сохранению природной среды и условий обитания коренного населения. В настоящее время для характеристики, картографирования и прогнозирования состояния окружающей среды ключевая роль отводится космическим снимкам [1, 2]. Наиболее заметные по масштабам нарушения природных ландшафтов северных территорий связаны с лесными и тундровыми пожарами, охватывающими большие площади. По данным спутников Landsat установлено, что за 40 лет с начала освоения крупнейших нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) Тазовского полуострова в результате пожаров был уничтожен коренной растительный и почвенный покров на 21% его территории (~ 14 000 км²) [3].

Для характеристики типов трансформаций тундровых ландшафтов и динамики процессов с использованием данных дистанционного зондирования Земли важнейшую роль играет такой параметр, как температура земной поверхности (Land Surface Temperature), рассчитываемая на основе изображений в инфракрасном (ИК) тепловом диапазоне. Сопоставление разновременных спектральных изображений, в том числе и тепловых, связано с проблемой влияния ряда неинформативных факторов, включая различия углов и времени съемки, условий пропускания атмосферы и калибровочных данных, погрешностей координатной привязки изображений [4]. Кроме того, земная поверхность находится в области нестационарных тепловых процессов, включая случайные, спорадические колебания температуры воздуха у поверхности, к которым весьма чувствительны тепловые изображения. Для снижения погрешностей, связанных с влиянием перечисленных факторов, разрабатываются методы коррекции, суть которых состоит в приведении разновременных спектральных изображений к единым условиям влияния различных системных и случайных факторов. Большинство разработанных методов коррекции изображений в видимом и ближнем ИК диапазоне [5–14] могут быть применимы для изображений в дальней ИК (тепловой) области спектра.

Несмотря на достаточно большое количество публикаций по этой теме, на сегодняшний день практически нет результатов аналогичных исследований для арктических и субарктических районов России. Цель настоящей работы – разработка и апробация методики относительной радиометрической коррекции тепловых изображений Landsat для количественной оценки изменений температуры поверхности тундровых ландшафтов с учетом особенностей территорий Крайнего Севера.

Основные положения методики радиометрической коррекции тепловых изображений со спутников Landsat

Для изучения и мониторинга трансформаций тундровых ландшафтов, в том числе в зонах вероятного антропогенного воздействия, наиболее приемлемы данные спутников Landsat 4, 5, 7, 8. Мультиспектральные снимки этих спутников охватывают значительный временной интервал (с 1982 г. по настоящее время), имеют спектральные каналы в дальнем ИК (тепловом) диапазоне с чувствительностью по температуре 0,4 К. В зависимости от номера спутника пространственное разрешение снимков в тепловом диапазоне – 60, 100 и 120 м, что позволяет проводить тематическое картографирование в масштабе от 1:100 000 и мельче. Спутники Landsat движутся по солнечно-синхронной орбите и съемку одной и той же территории осуществляют приблизительно в одно время.

Местное время съемки исследуемого района Уренгойского НГКМ со спутников Landsat лежит в интервале от 10 ч. 30 мин. до 11 ч. 30 мин.

Влияние внешних факторов на температуру земной поверхности (пропускание атмосферы, метеорологические условия) носит случайный характер, поэтому, в основном, методы коррекции тепловых изображений базируются на связи статистических моментов анализируемых распределений температуры. Наибольшее распространение получили относительные методы коррекции, основанные на сравнении гистограмм распределений, а также линейной регрессии двух изображений [11–14]. Как правило, коэффициенты уравнения регрессии определяются по так называемым псевдоинвариантным областям (ПИО), характеризующимся как фоновые, без изменений состояния поверхностного покрова. Участки, относимые к ПИО, могут выбираться вручную, с использованием априорных сведений о неоднородностях ландшафта [15] или автоматизированно, в частности, по методу так называемой ортогональной регрессии на основе корреляционного анализа двух мультиспектральных изображений [13, 14]. В последнем случае предполагается, что участки (пиксели) с близкими спектральными характеристиками не претерпели изменений, и их можно отнести к ПИО. В то же время полностью исключить субъективный фактор не удастся, в частности, необходимо выбирать пороговое значение коэффициента корреляции [14] между парами мультиспектральных изображений. Кроме того, в отношении тепловых изображений не всегда высокая корреляция спектральных характеристик свидетельствует об инвариантности (стабильности) физических свойств участков. В частности, это могут быть локальные изменения теплофизических свойств покрова или интенсивности эвапотранспирации, не проявляемые в спектральных свойствах. Такие участки, по возможности, должны быть исключены из ПИО.

Для решения задач, связанных с анализом разновременных тепловых изображений, для их радиометрической коррекции наиболее приемлем относительный метод, поскольку он (теоретически) позволяет выявлять изменения температуры на уровне пороговой чувствительности. В относительных методах основным информативным параметром является величина температурного контраста (ТК), под которым понимается разница температуры поверхности любых двух участков (пикселей), измеренная в один и тот же момент времени. В данном случае конкретная методическая задача состояла в разработке простого способа коррекции ТК, позволяющего минимизировать погрешности при сопоставлении разновременных тепловых изображений Landsat. В основе предлагаемого

решения лежит широко используемый метод линейной регрессии двух изображений, (полученных в разное время), одно из которых принимается как опорное (эталонное), а второе как корректируемое.

Очевидно, что единственным критерием правильности выбора коэффициентов регрессии и метода коррекции в целом является минимальная возможная погрешность, характеризующая расхождение ТК опорного и корректируемого изображений в границах фоновой области (ФО) стабильного состояния ландшафта. Кроме того, очевидно, что существует только единственный оптимальный набор значений коэффициентов регрессии, по которым достигается минимально возможное значение погрешности.

Коэффициенты (A , B) линейной регрессии могут быть определены из уравнения

$$T_o = A \cdot T_k + B ,$$

где T_o и T_k – значения температуры поверхности опорного и исходного корректируемого изображений, соответственно. Значения температуры скорректированного изображения T_k^* определяются по уравнению

$$T_k^* = A \cdot T_k + B . \quad (1)$$

В настоящей работе формирование ПИО предлагается проводить на основе методов неконтролируемой классификации, в частности, по алгоритму Isodata с использованием всех спектральных каналов Landsat за исключением панхроматических и тепловых каналов. Предварительно для опорного и корректируемого изображений строится общая маска, покрывающая водные поверхности, антропогенные объекты, а также все исследуемые участки вероятных трансформаций ландшафта. Оставшиеся немаскированные территории ФО обоих снимков классифицируются с одинаковым количеством классов и идентичными параметрами алгоритма Isodata. Полученные распределения классов сравниваются, и проводится процедура устранения пикселей с несовпадающими классами, а оставшиеся участки с наиболее близкими спектральными свойствами включаются в основной (исходный) ряд ПИО. Предлагаемый подход основан на том обстоятельстве, что при неизменном количестве классов изменение спектральных характеристик пикселей приводит к их переходу из одного класса в другой.

Расчеты коэффициентов регрессии и погрешностей проводились по методу кросс-валидации (КВ) с делением всей ФО на $n = 5$ зон приблизительно одинаковой площади [16]. Пять пар коэффициентов регрессии определялись по ПИО последовательно и по их средним значениям рассчитывались коэффициенты регрессии для коррекции изображения

согласно (1). Поскольку значения ТК опорного изображения приняты как эталон, то отклонения значений ТК других изображений (исходных или скорректированных) относительно опорного рассматривались как погрешность. Средняя абсолютная погрешность коррекции ТК определялась как

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta T_{0i} - \Delta T_{ki}^*|, \quad (2)$$

где ΔT_{0i} и ΔT_{ki}^* – значения максимального ТК опорного и скорректированного изображений по i -ой зоне ФО. Для оценки расхождений ТК до коррекции в (2) подставляются исходные значения ΔT_{ki} . Дополнительно рассчитывается относительная погрешность

$$\delta = \frac{\theta}{\Delta \bar{T}_0}, \quad (3)$$

где $\Delta \bar{T}_0$ – среднее по n зонам значение максимального ТК опорного изображения.

Коэффициенты регрессии определялись только по участкам ПИО, а погрешности по ФО – в каждой из пяти зон. Для определения коэффициентов уравнения регрессии использовались средние значения \bar{T}_0 и \bar{T}_k по каждому классу ПИО.

Как отмечалось выше, не все классы типов покрова сохраняют стабильное физическое состояние при изменении внешних условий. В частности, песчаные отмели на лайдах и в поймах, характеризующиеся идентичными спектральными характеристиками, не всегда одинаково хорошо вписываются в общую картину регрессии, что может быть связано с подтоплением и дренированием. Для минимизации погрешностей, связанных с другими (не спектральными) факторами (в том числе теплофизическими), процесс определения оптимальных коэффициентов регрессии проводится в несколько итераций. На первом шаге ПИО составляют все изначально выделенные классы типов покрова. Если погрешность явно не соответствует заданным критериям, из ПИО удаляются классы, участие которых может ее повышать, и повторно проводится расчет коэффициентов регрессии. Как правило, удаляются классы, занимающие минимальные проценты площади. Опыт показывает, что достаточно 2–3 итераций для минимизации погрешности.

Основанием для проведения коррекции может быть значение параметра θ , существенно превышающее пороговую чувствительность (0,4 K), а также отличающиеся от 1 отношения

$$C_1 = \frac{\sigma_0}{\sigma_k}; \quad C_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{ki}},$$

где σ_{oi} и σ_{ki} – среднеквадратические отклонения (СКО) распределений опорного и корректируемого изображений на каждом из n участков ФО. Различия значений C_1 и C_2 характеризуют неоднородность влияния различных случайных факторов в границах ФО. Как правило, опорное тепловое изображение выбирается с более высокими значениями СКО и максимальными ТК по ФО.

Для характеристики изменений состояния покрова и расчета коэффициента излучения поверхности использовался вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [17], характеризующий содержание хлорофилла (зеленой массы) в покрове. Индекс MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) использовался для маскирования водных поверхностей [18]. Расчет температуры поверхности покрова (T) и коэффициента излучения проводился по формулам, предлагаемым в работах [19, 20]. В итоговых построениях все значения температур поверхности и ТК даны в °C, а пространственное разрешение изображений температуры после расчетов составляет 30 м.

В соответствии с предлагаемым подходом могут корректироваться не только тепловые изображения, но и любые спектральные изображения и индексы. В частности, в данной работе по аналогичной схеме корректировались изображения индекса NDVI. Обработка и анализ данных космической съемки проводились с помощью программного комплекса ENVI 4.8.

Результаты апробации методики радиометрической коррекции тепловых изображений в районе Уренгойского НГКМ

Апробация методики осуществлялась на примере района площадью ~ 300 км², расположенного на территории Уренгойского НГКМ в центральной части Тазовского полуострова. Координаты района: верхний левый угол – 66° 34' 30.06" СШ, 75° 46' 5.24" ВД; нижний правый угол – 66° 24' 58.55" СШ, 76° 9' 15.72" ВД. Район относится к равнинным территориям субарктической лесотундровой зоны и расположен на широте полярного круга. Природные ландшафты здесь характеризуются существенной неоднородностью растительного и почвенного покрова, занимающего до 95% площади (без учета водоемов), густой сетью рек и озер, а также большим количеством болот. Коренная растительность представлена березово-лиственничным редколесьем, а в нижнем ярусе кустарничками и преимущественно лишайниковым покровом толщиной от 2 до 20 см.

Фотография части района в излучине реки Нгарка-Табьяха, сделанная Геннадием Чувашовым в августе 2002 г., приведена на рис. 1 (ресурс Google Earth). Район относится к зоне прерывистого распространения мерзлоты, глубина сезонно-талого слоя 0,3–2,0 м. [21]. В границах исследуемого района нет промышленных и хозяйственных объектов, дорог, трубопроводов, но есть гари разных лет, выявленные на основе ретроспективного анализа данных космической съемки и полевых наблюдений [3].



Рис. 1. Фотография части района в излучине реки Нгарка-Табьяха (фото Г. Чувашова)

Приведенные на рис. 2, а и рис. 2, б изображения (RGB-синтез 5, 4, 3 каналов Landsat 5) исследуемого района относятся к датам съемки 20.07.1987 и 03.08.1989, соответственно. Контурами обозначены границы участков, пройденных пожаром в разные годы (1 – 1987; 2 – 1989; 3 – 1983), а также границы незатронутого огнем верхового болота. До пожаров на всех трех участках сохранялся приблизительно один и тот же напочвенный и растительный покров. Сгоревшие участки относятся к одному морфогенетическому типу, а именно к плоским озерно-ледниковым равнинам, относительно дренированным, с абсолютными отметками рельефа 60–70 м.

Для характеристики изменений температуры поверхности на гаях в процессе развития вторичного растительного и напочвенного покрова, а также для оценки погрешностей коррекции тепловых изображений были использованы дневные снимки

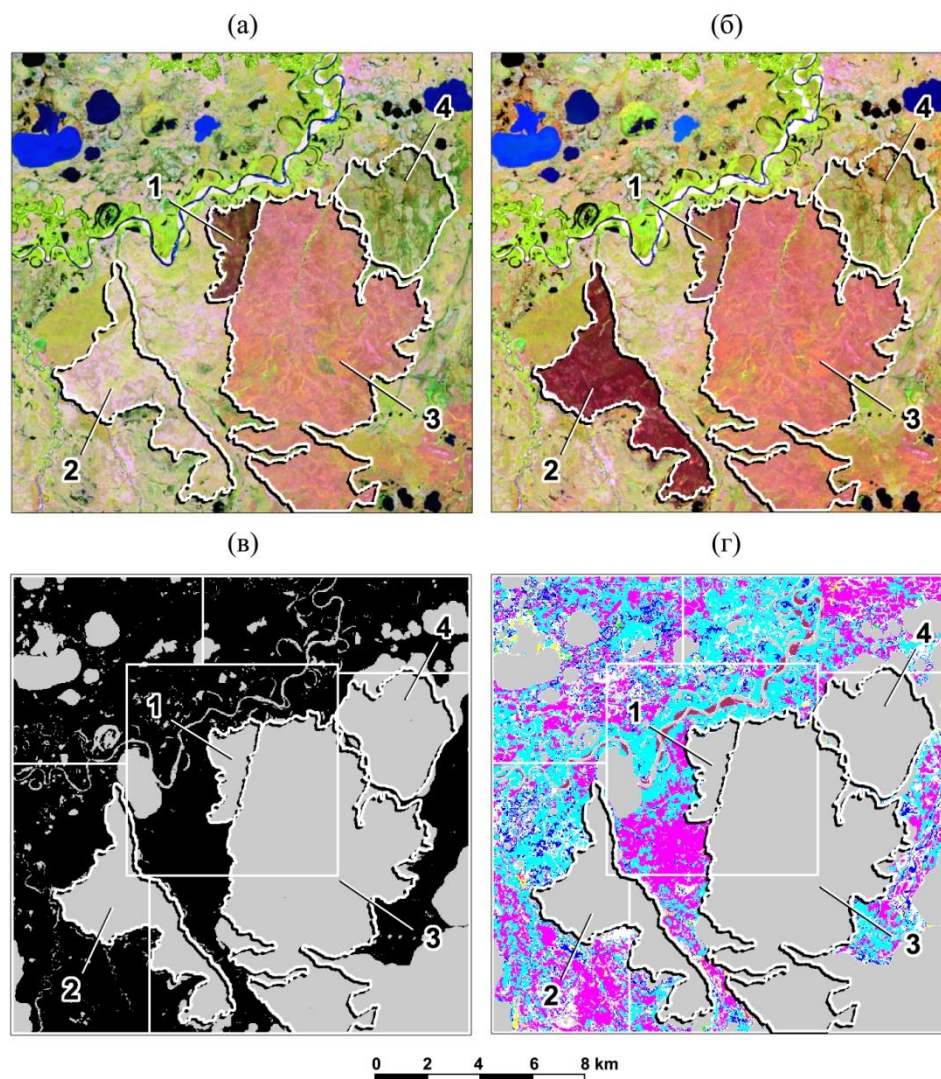


Рис. 2. Изображения (RGB-синтез 5, 4, 3 каналов Landsat 5) района съемки 20.07.1987 (а) и 03.08.1989 (б); маскированная (серый тон) и фоновая (черный тон) области (в); общие ПИО (цветные тона), построенные по снимкам 20.07.1987 и 03.08.1989 (г); 1, 2, 3 – сгоревшие участки, 4 – болото

Landsat за период с 1987 по 2017 гг. В табл. 1 приведены сведения о датах съемки, значения максимальной температуры воздуха (T_{θ}), а также средние значения температуры поверхности (\overline{T}), СКО (σ) и максимальные значения ТК (ΔT) по ФО, рассчитанные по данным Landsat. Для снижения влияния сезонных (фенологических) факторов выбирались космические снимки только июля и августа. Снимок 20.07.1987 г. (см. табл. 1) был взят как опорный, относительно которого корректировались тепловые изображения и изображения по индексу NDVI всех остальных снимков серии.

Таблица 1

Даты съемки, номера Landsat, значения максимальной температуры воздуха и статистические характеристики распределений температуры поверхности

№	Дата съемки	Landsat	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\bar{T}, ^\circ\text{C}$	$\sigma, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
1	20.07.1987	5	15,8	22,4	2,122	11,6
2	14.08.1987	5	18,8	18,0	1,698	9,0
3	31.07.1988	5	13,5	14,8	1,732	9,4
4	03.08.1989	5	13,6	17,7	1,747	9,2
5	12.07.1990	5	30,4	29,6	2,089	10,7
6	07.08.1999	7	15,7	21,0	1,884	10,8
7	26.08.2009	5	20,7	22,1	1,514	9,0
8	20.07.2013	8	31,7	33,5	3,052	17,1
9	15.08.2014	8	18,4	22,2	1,563	8,8
10	01.07.2015	8	17,8	24,2	1,988	11,4
11	06.07.2017	8	12,5	19,7	1,676	10,2

Предварительная обработка данных включала отбор безоблачных снимков, калибровку спектральных каналов, геометрическую коррекцию с приведением к проекции UTM (datum WGS-84), фрагментирование исследуемого района из исходного кадра. На этом этапе также осуществлялось маскирование (рис. 2, в, серый тон) водных поверхностей (по индексу MNDWI), всех исследуемых нарушенных участков, а также участка № 4, поскольку болота, как правило, характеризуются нестабильными гидрологическими условиями. Остальные участки (рис. 2, в, черный тон) были отнесены к ФО, занимавшей в 1987–2015 гг. 51,3% от площади всего района. Для снимка 2017 г. формировалась другая ФО, занимавшая 36,0% площади района, поскольку в 2016 г. выгорела территория севернее реки Нгарка-Табъяха. Белыми прямыми линиями (рис. 2, в) обозначены границы участков анализа по методу KB.

В соответствии с описанной выше методикой по алгоритму Isodata определялись общие для пары снимков ПИО. Пример формирования общих ПИО, включающих шесть классов типов поверхности (обозначенных определенным цветом) для пары снимков 1987

и 1989 гг., приведен на рис. 2, г. На рисунке видно доминирование по площади двух типов покрова. Увеличение числа классов больше шести в данном случае не приводило к улучшению результатов, поскольку новые классы занимали менее 1% площади от ПИО.

Результаты коррекции серии анализируемых тепловых изображений со спутников Landsat приведены в табл. 2. В столбцах таблицы даны даты корректируемых снимков; значения C_1 , C_2 ; коэффициента A уравнения регрессии (1); число (K) классов типов поверхности, относящихся к выбранным ПИО; коэффициента достоверности аппроксимации (R^2) уравнения регрессии; погрешностей (θ ; δ), характеризующих различия ТК изображений до и после коррекции. Коэффициент B уравнения регрессии (1) не влияет на изменение ТК и учитывается только в итоговых построениях для характеристики изменений температуры и ТК поверхности. Величины погрешностей, а также коэффициентов A и R^2 представляют собой средние значения этих параметров, рассчитанных по методу КВ. Значения ТК определены с доверительным интервалом в 99%. Поскольку погрешности рассчитаны для максимальных значений ТК в границах ФО, величина абсолютной погрешности для любых других значений ТК может быть рассчитана по значениям относительной погрешности, приведенным в табл. 2 согласно формуле (3).

Таблица 2

Значения параметров C_1 , C_2 , коэффициента A , числа K , коэффициента R^2 и погрешностей θ ; δ коррекции ТК

№	Даты съемки	C_1	C_2	A	K	R^2	До коррекции		После коррекции	
							$\theta, (^\circ\text{C})$	$\delta, (\%)$	$\theta, (^\circ\text{C})$	$\delta, (\%)$
1	14.08.1987	1,249	1,243	1,324	6	0,982	2,14	20,3	0,60	5,7
2	31.07.1988	1,225	1,239	1,242	5	0,998	1,84	17,5	0,64	6,0
3	03.08.1989	1,211	1,202	1,244	4	0,997	1,82	17,3	0,64;	6,0
4	12.07.1990	1,010	0,997	1,042	3	0,979	0,64	6,0	0,58	5,5
5	07.08.1999	1,120	1,115	1,080	5	0,954	1,00	9,5	0,44	4,2
6	26.08.2009	1,397	1,394	1,273	4	0,926	2,32	22,0	0,92	8,7
7	20.07.2013	0,691	0,699	0,633	4	0,965	5,42	51,6	0,98	9,3
8	15.08.2014	1,350	1,372	1,338	5	0,969	2,60	24,7	0,58	5,5
9	01.07.2015	1,064	1,077	1,058	4	0,993	0,50	4,7	0,62	5,9
10	06.07.2017	1,362	1,339	1,242	5	0,985	1,86	17,6	1,14	10,8

Высокие значения коэффициента R^2 в табл. 2 свидетельствуют о достаточно близком соответствии распределений температуры опорного и корректируемых тепловых изображений. Как следует из табл. 2, в основном, после коррекции удается снизить погрешность (различие ТК) в 2–5 раз, однако есть ситуации, когда коррекция не улучшает результат, в частности, для дат № 4 и № 9. Следует отметить, что исходные расхождения ТК для этих дат невелики, а значения C_1 , C_2 , A близки к 1. В подобных случаях проведение коррекции не оправдано. В ряду сюжетов выделяется снимок № 7 (20.07.2013), характеризующийся аномально высокими температурами, СКО и ТК (см. табл. 1). Коррекция этого изображения позволила существенно снизить расхождение ТК, однако итоговые погрешности для него остались выше средних (см. табл. 2), что, скорее всего, связано с изменением теплофизических свойств и режима эвапотранспирации некоторых типов покрова при аномально высоких температурах воздуха.

В качестве примера на рис. 3 приведены распределения температуры поверхности и гистограммы, характеризующие опорное изображение T_0 20.07.1987 (а), исходное (некорректированное) изображение T_k 14.08.1987 (б) и скорректированное изображение T_k^* 14.08.1987 (в). Белым тоном на изображениях обозначены водные поверхности. Процедура приведения к единому температурному фону заключалась в смещении распределений температуры корректируемых изображений до равенства средних значений \bar{T}_k и \bar{T}_k^* среднему значению $\bar{T}_0 = 22,4^\circ\text{C}$ по ФО. Динамический диапазон температур каждого распределения соответствует диапазону опорного теплового изображения (16°C). Изображения даны в 32 градациях цвета ($0,5^\circ\text{C}/\text{цвет}$). В итоге полученные изображения позволяют провести визуальное сравнение и оценку изменений температуры относительно опорного теплового изображения 20.07.1987.

Из табл. 2 видно, что по ФО максимальные ТК исходного теплового изображения 14.08.1987 ниже, чем у опорного на $2,14^\circ\text{C}$. При визуальном сравнении изображений (см. рис. 3, а, б) отчетливо видно общее снижение ТК, что может быть связано с понижением температуры воздуха (см. табл. 1).

После коррекции ТК заметно повысились и приблизились к значениям опорного распределения (см. рис. 3, а, в). В границах свежей гари (участок № 1), сформировавшейся в результате пожара в начале июля 1987 г., распределение температуры за месяц практически не поменялось, что подтверждает стабильность состояния «мертвого» покрова, на котором вторичная растительность развивается только на второй год после

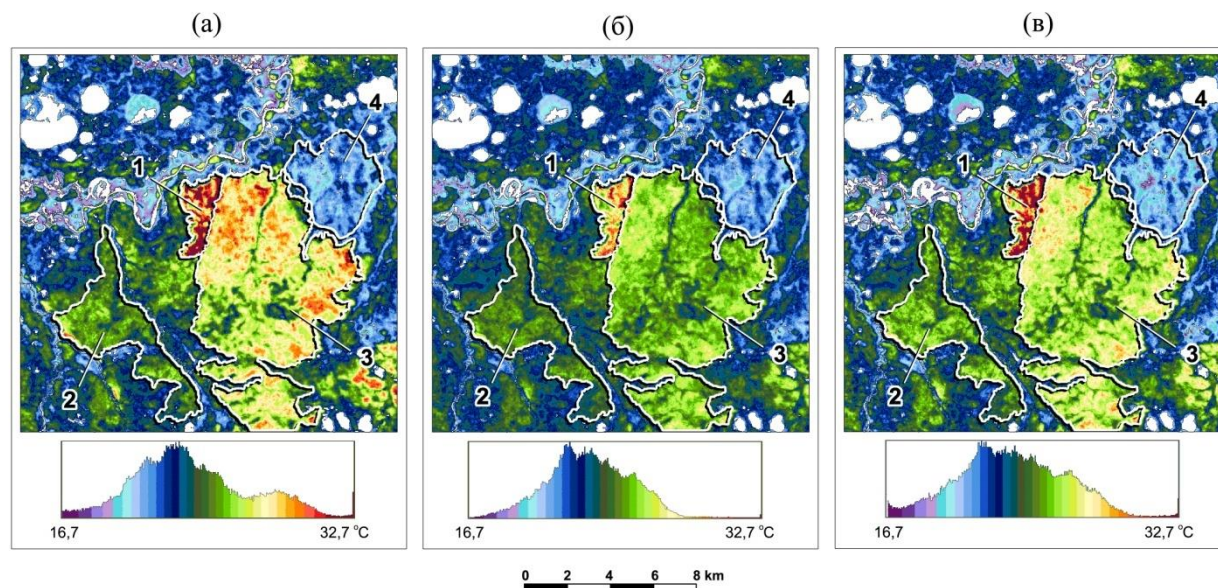


Рис. 3. Опорное изображение T_0 20.07.1987 (а); исходное (некорректированное) изображение T_k 14.08.1987 (б) и скорректированное изображение T_k^* 14.08.1987 (в)

пожаров. С другой стороны следует отметить заметное понижение температуры на участке № 3, сгоревшем в 1983 году, что может быть связано с интенсивным развитием на горях вторичного растительного и напочвенного покрова в летний период.

Характеристика многолетних вариаций температуры поверхности на участках пирогенного поражения в районе Уренгойского НГКМ

Процедура коррекции тепловых изображений позволяет смоделировать многолетние изменения ТК с оценкой погрешностей для каждой даты космической съемки. На рис. 4 приведено распределение температуры поверхности T_0 опорного изображения и скорректированные распределения температуры T_k^* разных лет на исследуемый район Уренгойского НГКМ. Как и в предыдущем примере, средние значения и динамический диапазон скорректированных распределений температуры приведены к значениям опорного теплового изображения по ФО. Таким образом, для любого участка может быть проведена количественная оценка изменений температуры поверхности за 30 лет относительно фоновых значений температуры опорного теплового изображения 20.07.1987.

Полученные после коррекции изображения позволяют построить графики, характеризующие многолетние вариации средних значений температуры поверхности (T) и индекса NDVI на исследуемых участках №№ 1–4 (рис. 5). Горизонтальными линиями на графиках обозначены уровни значений параметров до пожаров. Непосредственно после

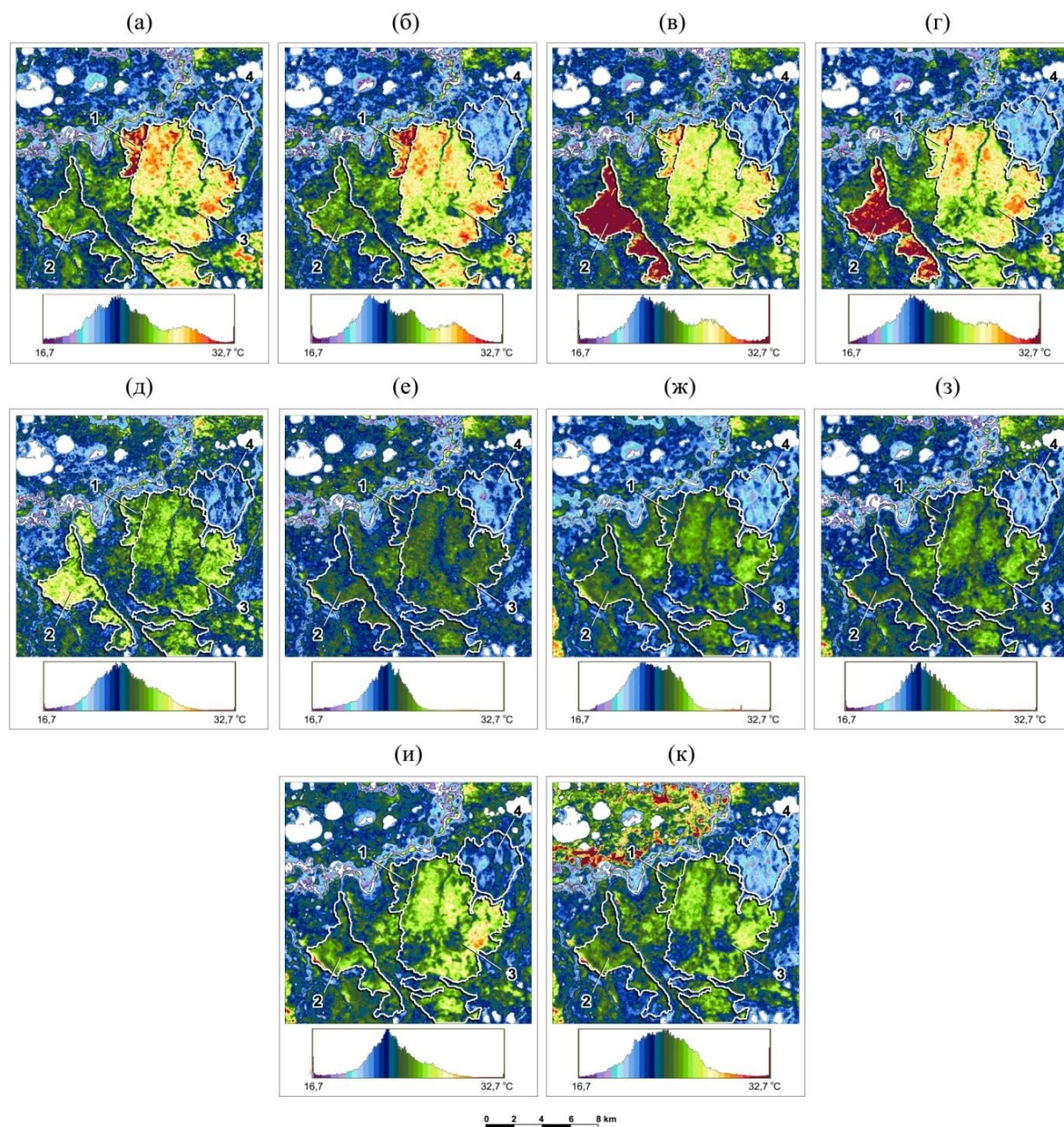


Рис. 4. Опорное изображение T_0 20.07.1987 (а) и скорректированные изображения T_K^* : 31.07.1988 (б); 03.08.1989 (в); 12.07.1990 (г); 07.08.1999 (д); 26.08.2009 (е); 20.07.2013 (ж); 15.08.2104 (з); 01.07.2015 (и); 06.07.2017 (к)

пожара температура поверхности поднимается на 8–10 °C, а значения индекса NDVI падают на 45% до 0,25–0,28. В процессе развития на горях вторичного растительного и напочвенного покрова температура снижается, а NDVI повышается. Своих первоначальных значений T достигает через 16–17 лет, а NDVI – через 12–13 лет, однако тенденции их изменения сохраняются, поскольку на горях в рост идет вторичный покров

(злаковые травы, мхи, кустарнички) с более высоким содержанием хлорофилла, более высокой температуропроводностью (тепловой инерцией) и интенсивностью транспирации. На участке болота (см. рис. 5, г) за весь период анализа вариации T не превышают $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а индекса NDVI – 10% .

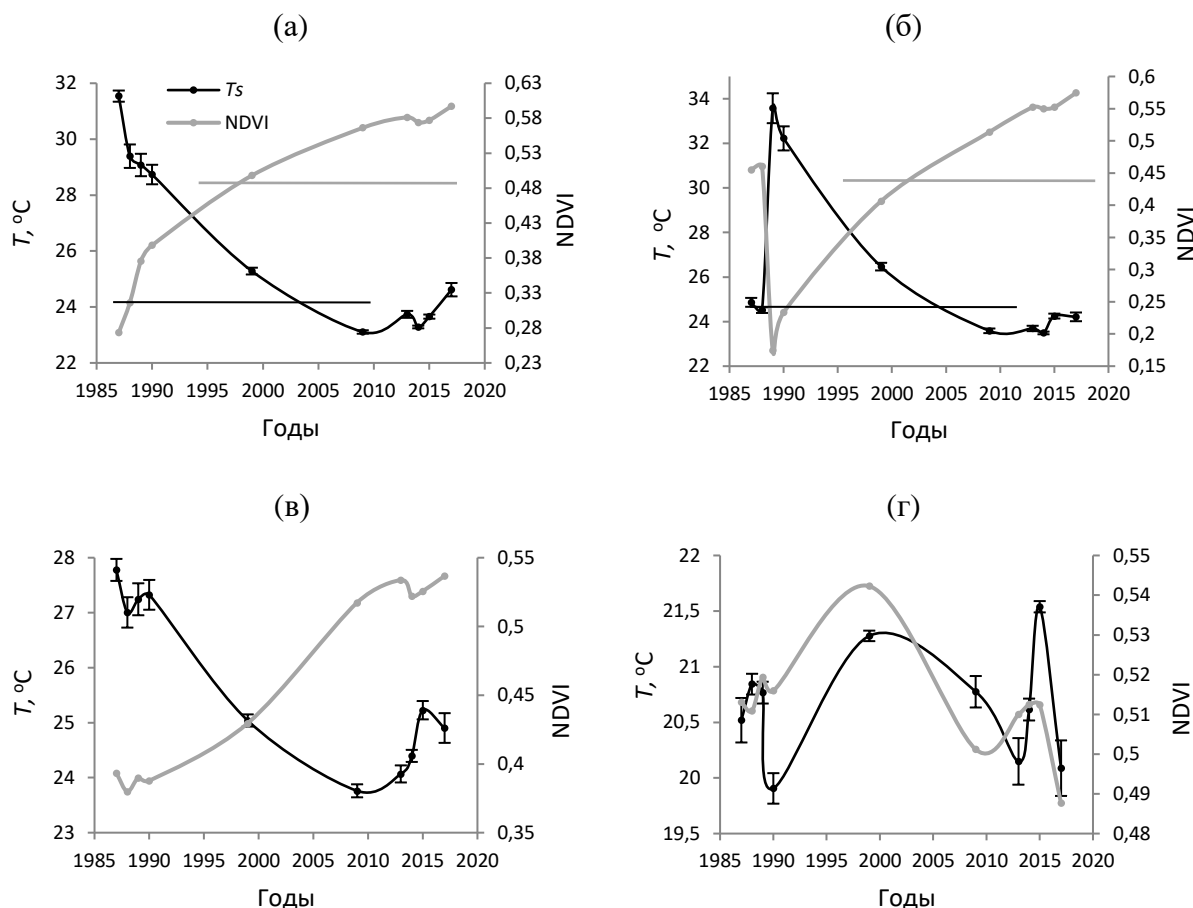


Рис. 5. Вариации средних значений температуры поверхности (T) и индекса NDVI на участках № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в) и № 4 (г); горизонтальные линии – уровни значений T (черная линия) и NDVI (серая линия) на участках № 1 и № 2 до пожаров

Абсолютная погрешность θ будет зависеть от величины ТК опорного изображения, поэтому значения θ для любого участка на каждую дату съемки могут быть определены согласно (3) по значениям ТК, рассчитанным относительно ФО опорного изображения и значениям относительной погрешности, взятым из табл. 2. Для анализируемых участков соответствующие планки абсолютных погрешностей приведены на графиках рис. 5. Для опорного изображения 20.07.1987 значение погрешности θ принято $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует пороговой чувствительности тепловых изображений ($0,4\text{ K}$).

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что величина погрешности коррекции тепловых изображений, в основном, зависит от нестабильности состояния ФО и неоднородного влияния внешних факторов (пропускания атмосферы, метеорологических условий). Предлагаемая методика позволяет минимизировать влияние участков нестабильного состояния ФО. Исключить или минимизировать неоднородное влияние внешних факторов достаточно сложно для любых методов коррекции тепловых изображений. Учитывая случайный характер влияния внешних факторов, достоверность результатов может быть повышена за счет повторных съемок на выбранных интервалах времени. Не всегда удастся минимизировать погрешность до приемлемых значений, однако каждый случай уникален, и общей рекомендацией, в этой связи, может быть расчет индивидуальных погрешностей и отбор сюжетов с их допустимым уровнем.

Количественная оценка многолетних изменений температуры поверхности позволяет характеризовать длительность вторичных сукцессий на участках пирогенного поражения растительного и почвенного покрова. До пожаров три сгоревших участка в исследуемом районе Уренгойского НГКМ находились в схожих ландшафтных условиях, поэтому можно предположить приблизительно равные сроки стабилизации температуры поверхности. Судя по графикам (см. рис. 5, а, б, в), время достижения минимальных значений температуры наступает через 25–28 лет после пожара. Приблизительно в такие же сроки индекс NDVI достигает максимальных значений, что может быть связано со стабилизацией состояния покрова и переходом в следующую стадию сукцессии.

Сильная отрицательная корреляция T и NDVI представляет собой типичную картину процесса трансформации тундрового покрова после пожара, поэтому любые отклонения от подобной связи могут свидетельствовать о завершении первой стадии сукцессии или влиянии других процессов. В этой связи представляет интерес повышение T после 2009 г. (см. рис. 5, а, б, в) на фоне относительно стабильных значений индекса NDVI. Одной из причин может быть изменение гидрологической ситуации, в частности, дренирование участков, поскольку в тундре температура поверхности более чувствительна к изменению влажности покрова по сравнению с индексом NDVI. Важную роль в этом играют мелкие (немаскированные) водоемы, лужи и протоки, поскольку

уменьшение их площади приводит к одновременному повышению температуры поверхности и индекса NDVI даже при неизменном объеме зеленой массы в покрове. Подобные процессы более вероятны на участках с нестабильным гидрологическим режимом, в частности, на болотах. Примером может служить положительная корреляция значений T и NDVI на болотистом участке (см. рис. 5, г) в период с 1990 по 2009 гг. Другая причина роста T после 2009 г. может быть связана с изменением режима транспирации на определенной стадии вторичной сукцессии.

В условиях проведенного эксперимента абсолютная погрешность на уровне пороговой чувствительности (0,4 K) достигается для ТК, не превышающих 3 °C. В данном случае – это приемлемый результат, поскольку для районов тундры высокая чувствительность необходима при изучении локальных опасных геокриологических процессов (термокарст, термоэрозия, заболачивание и др.) на ранних стадиях развития, характеризующихся незначительными изменениями влажности и температуры покрова. В целом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения разработанной методики, в том числе для изучения ареалов влияния промышленных объектов на состояние мерзлых грунтов и тундровых покровов.

Выводы

1. Разработана методика относительной радиометрической коррекции тепловых изображений со спутников Landsat с использованием алгоритма неконтролируемой классификации для определения псевдо-инвариантных областей с идентичными спектральными характеристиками опорного и корректируемого изображений. Минимизация погрешности коррекции температурных контрастов (ТК) осуществляется путем итеративного определения оптимального количества классов и коэффициентов линейной регрессии по методу кросс-валидации.

2. Разработанная методика позволяет в 2–5 раз снизить погрешности при коррекции ТК, что, в целом, свидетельствует о ее эффективности.

3. В условиях проведенного эксперимента абсолютная погрешность коррекции ТК, соответствующая пороговой чувствительности тепловых изображений (0,4 K), может быть достигнута для ТК менее 3 °C.

4. На основе временного ряда скорректированных тепловых изображений и индекса NDVI участков пирогенного поражения в районе Уренгойского НГКМ показано, что процесс относительной стабилизации состояния тундрового покрова длится 25–28 лет.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли», № АААА-А19-119021590079-6).

Литература

1. *Кравцова В.И.* Космические снимки – визуальный источник экологической информации (на примере экологического атласа России) // *Геодезия и картография*. 2019. Т. 80, № 1. С.84–93. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-943-1-84-93>
2. *Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А.* Технологии дистанционного выявления и мониторинга дегазации Земли в Арктике: полуостров Ямал, озеро Нейто // *Арктика: экология и экономика*. 2018. № 2(30). С. 83–93. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-83-93>
3. *Корниенко С.Г.* Картографирование пирогенных нарушений растительного покрова на Тазовском п-ове по данным спутников Landsat // *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2018. Вып. 1(20). С. 15. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art15>
4. *Paolini L., Grings F., Sobrino J.A., Jimenez Munoz J.C., Karszenbaum H.* Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 4. P. 685–704. <https://doi.org/10.1080/01431160500183057>
5. *Yang X., Lo C.P.* Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2000. Vol. 66, No. 8. P. 967–980. <https://pdfs.semanticscholar.org/0a0f/21d33163519eee054b717575bb14f3649dfd.pdf> (Дата обращения 29.09.2019).
6. *Nielsen A.A., Conradsen K., Simpson J.J.* Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies // *Remote Sensing of Environment*. 1998. Vol. 64, No.1. P. 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00162-4)
7. *Schneibel A., Frantz D., Röder A., Stellmes M., Fischer K., Hill J.* Using annual Landsat time series for the detection of dry forest degradation processes in South-Central Angola // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 9. P. 905. <https://doi.org/10.3390/rs9090905>
8. *Sobrino J.A., Julien Y.* Time series corrections and analyses in thermal remote sensing / *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. Springer. 2013. P. 267–285. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6_14

9. *Yang M-D., Chen S-C., Tsai H.P.* A long-term vegetation recovery estimation for Mt. Jou-Jou using multi-date SPOT 1, 2, and 4 images // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 9. P. 893. <http://doi.org/10.3390/rs9090893>
10. *Padró J-C., Pons X., Aragonés D., Díaz-Delgado R., García D., Bustamante J., Pesquer L., Domingo-Marimon C., González-Guerrero O., Cristóbal J., Doktor D., Lange M.* Radiometric correction of simultaneously acquired Landsat-7/Landsat-8 and Sentinel-2A imagery using Pseudoinvariant Areas (PIA): Contributing to the Landsat time series legacy // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. P. 1319. <https://doi.org/10.3390/rs9121319>
11. *Martinez-Alonso S., Jakosky B.M., Mellon M.T., Putzig N.E.* A volcanic interpretation of Gusev Crater surface materials from thermophysical, spectral and morphological evidence // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. E01003. <https://doi.org/10.1029/2004JE002327>
12. *Rahman M.M., Hay G.J., Couloigner I., Hemachandran B., Bailin J.A.* A comparison of four radiometric normalization techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared flight lines of a complex urban scene // *ISPRS Journal. Photogramm. Remote Sens.* 2015. Vol. 106. P. 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002>
13. *Canty M.J., Nielsen A.A.* Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, No. 3. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
14. *Scheidt S., Ramsey M., Lancaster N.* Radiometric normalization and image mosaic generation of ASTER thermal infrared data: An application to extensive sand sheets and dune fields // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, No. 3. P. 920–933. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.020>
15. *Schott J.R., Salvaggio C., Volchok W.J.* Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 26, No 1. P. 1–16. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2)
16. *Sun Y., Gao C., Li J., Wang R., Liu J.* Quantifying the effects of urban form on land surface temperature in subtropical high-density urban areas using machine learning // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 8. P. 959. <https://doi.org/10.3390/rs11080959>
17. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

18. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
19. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89, No. 4. P. 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
20. *Van de Griend A.A., Owe M.* On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces // *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 6. P. 1119–1131. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169308904400>
21. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова и С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.

Correction of Landsat thermal images in the study of tundra landscape transformations: the case of the Urengoy oil and gas condensate field

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow
E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Abstract. A method for the relative radiometric correction of Landsat thermal images to quantify the changes in the surface temperature of tundra landscapes has been developed. A distinctive feature of the methodology is the use of unsupervised classification algorithm to determine pseudo-invariant areas with identical spectral characteristics of the reference and corrected thermal images. The error in temperature contrast correction is minimized by iteratively determining the optimal number of classes and linear regression coefficients using the cross-validation method. The proposed methodology allows to reduce errors by 2–5 times during temperature contrasts correction, which, in general, indicates its effectiveness. Under experimental conditions, the absolute correction error corresponding to the threshold sensitivity of thermal images (0.4 K) can be achieved for temperature contrasts less than 3 °C.

Keywords: satellite images, correction, temperature contrast, thermal image, tundra landscape.

Citation: Kornienko S.G. Correction of Landsat thermal images in the study of tundra landscape transformations: the case of the Urengoy oil and gas condensate field // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art17> (In Russ.).

References

1. Kravtsova V.I. Satellite images as visual source of environmental information (at example of Russia's Ecological Atlas) // Geodesy and Cartography. 2019. Vol. 80, No. 1. P. 84–93. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-943-1-84-93> (In Russ.).
2. Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Technologies for remote detection and monitoring of Earth degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Lake Neito // Arctic: Ecology and Economy. 2018. No. 2(30). P. 83–93. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-83-93> (In Russ.).
3. Kornienko S.G. Mapping of pyrogenic disturbance of vegetation on the Taz Peninsula according to Landsat // Actual Problems of Oil and Gas. 2018. Iss. 1(20). P. 15. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art15> (In Russ.).
4. Paolini L., Grings F., Sobrino J.A., Jimenez Munoz J.C., Karszenbaum H. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, No. 4. P. 685–704. <https://doi.org/10.1080/01431160500183057>

5. Yang X., Lo C.P. Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2000. Vol. 66, No. 8. P. 967–980. <https://pdfs.semanticscholar.org/0a0f/21d33163519eee054b717575bb14f3649dfd.pdf> (Accessed on 29.09.2019).
6. Nielsen A.A., Conradsen K., Simpson J.J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies // *Remote Sensing of Environment*. 1998. Vol. 64, No.1. P. 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00162-4)
7. Schneibel A., Frantz D., Röder A., Stellmes M., Fischer K., Hill J. Using annual Landsat time series for the detection of dry forest degradation processes in South-Central Angola // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 9. P. 905. <https://doi.org/10.3390/rs9090905>
8. Sobrino J.A., Julien Y. Time series corrections and analyses in thermal remote sensing / *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. Springer. 2013. P. 267–285. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6_14
9. Yang M-D., Chen S-C., Tsai H.P. A long-term vegetation recovery estimation for Mt. Jou-Jou using multi-date SPOT 1, 2, and 4 images // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 9. P. 893. <http://doi.org/10.3390/rs9090893>
10. Padró J-C., Pons X., Aragonés D., Díaz-Delgado R., García D., Bustamante J., Pesquer L., Domingo-Marimon C., González-Guerrero O., Cristóbal J., Doktor D., Lange M. Radiometric correction of simultaneously acquired Landsat-7/Landsat-8 and Sentinel-2A imagery using Pseudoinvariant Areas (PIA): Contributing to the Landsat time series legacy // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 12. P. 1319. <https://doi.org/10.3390/rs9121319>
11. Martinez-Alonso S., Jakosky B.M., Mellon M.T., Putzig N.E. A volcanic interpretation of Gusev Crater surface materials from thermophysical, spectral and morphological evidence // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. E01003. <https://doi.org/10.1029/2004JE002327>
12. Rahman M.M., Hay G.J., Couloigner I., Hemachandran B., Bailin J.A. A comparison of four radiometric normalization techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared flight lines of a complex urban scene // *ISPRS Journal. Photogramm. Remote Sens.* 2015. Vol. 106. P. 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002>

13. *Canty M.J., Nielsen A.A.* Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, No 3. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
14. *Scheidt S., Ramsey M., Lancaster N.* Radiometric normalization and image mosaic generation of ASTER thermal infrared data: An application to extensive sand sheets and dune fields // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, No. 3. P. 920–933. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.020>
15. *Schott J.R., Salvaggio C., Volchok W.J.* Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 26, No. 1. P. 1–16. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2)
16. *Sun Y., Gao C., Li J., Wang R., Liu J.* Quantifying the effects of urban form on land surface temperature in subtropical high-density urban areas using machine learning // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 8. P. 959. <https://doi.org/10.3390/rs11080959>
17. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
18. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
19. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89, No. 4. P. 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
20. *Van de Griend A.A., Owe M.* On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces // *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 6. P. 1119–1131. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169308904400>
21. Permafrost and oil and gas development / Ed. E.S. Mel'nikov, S.E. Grechishchev. Moscow: GEOS, 2002. 402 p. (In Russ.).