# Картографирование теплофизических неоднородностей тундровых ландшафтов по данным космической съёмки (на примере полуострова Ямал)

## С. Г. Корниенко

#### Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Теплофизические (теплоизоляционные) свойства криогенных тундровых ландшафтов относятся к числу основных факторов, от которых зависит состояние многолетнемерзлых пород, в первую очередь глубина протаивания и промерзания грунтов. До настоящего времени практически не было результатов экспериментальных исследований, касающихся создания карт теплофизических свойств тундрового поверхностного покрова. В представленной работе впервые на примере территории центральной части п-ова Ямал рассмотрена возможность картографирования теплофизических неоднородностей тундрового почвенно-растительного покрова слоя суточных колебаний температуры по нормированным распределениям «кажущейся тепловой инерции» (Apparent Thermal Inertia,  $ATI_N$ ), построенным на основе данных спутников NOAA и MetOp-A/B (сканер AVHRR). В статье приведены результаты сравнения распределений ATI<sub>N</sub>, рассчитанных по двум разным алгоритмам. Анализ нескольких распределений ATI<sub>N</sub>, вычисленных по данным съёмки разных дат и лет, свидетельствует об их неслучайном характере и практической возможности их использования для картографирования теплофизических неоднородностей покрова территорий арктических и субарктических тундр. В качестве критерия допустимых (приемлемых) расхождений разных распределений ATI<sub>N</sub>, связанных с влиянием случайных факторов, предлагается использовать значение среднеквадратического отклонения (СКО) диаграммы рассеяния двух распределений, построенных по данным съёмки одного и того же дня, но разного времени суток. Отмечена общая тенденция уменьшения средних значений и СКО параметра ATI<sub>N</sub> при повышении геоморфологических уровней от лайды и поймы до морских террас.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, кажущаяся тепловая инерция, картографирование, почвенно-растительный покров, тундра

Одобрена к печати: 24.10.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-169-179

#### 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. Важнейшее значение в этой связи приобретают исследования, связанные с характеристикой и тематическим картографированием природных комплексов тундровых ландшафтов. Теплофизические (теплоизоляционные) свойства поверхностного тундрового почвенно-растительного покрова (ПРП) относятся к числу важнейших факторов, от которых зависит состояние мёрзлых грунтов (Павлов, 1979). Под ПРП в данном случае понимается верхний слой земной поверхности, по толщине не превышающий глубину проникновения суточных колебаний температуры (СКТ) и включающий тундровый напочвенный растительный покров, а также нижележащие слои субстрата и грунта. С вариациями теплофизических свойств ПРП в криолитозоне связано изменение глубины протаивания (промерзания) пород (Гаврильев, 2004) и, как следствие, изменение объёмов эмиссии биогенных парниковых газов. На локальном уровне изменение теплофизических свойств поверхности и, соответственно, условий теплообмена мёрзлых грунтов с атмосферой приводит к активизации опасных геокриологических процессов вблизи промышленных и инфраструктурных объектов (Пендин, Ганова, 2009). Информация о теплофизических свойствах тундрового ПРП играет важную роль при характеристике состава покрова и оценке пожароопасности территорий.

Картографирование теплофизических неоднородностей ПРП до глубины проникновения СКТ может осуществляться на основе данных дистанционного зондирования Земли в оптическом (видимом и тепловом) диапазоне длин волн по так называемой «кажущейся тепловой инерции» (Apparent Thermal Inertia, *ATI*) (Negm et al., 2017; Ramakrishnan et al., 2013; Schieldge et al., 1980; Song, Jia, 2016; Van Doninck et al., 2011; Verstraeten et al., 2006). Метод получил широкое распространение за рубежом — в основном для оценки влажности растительных покровов и почвы, однако практически не применялся для характеристики теплофизических свойств поверхностных покровов арктических и субарктических тундр. Объективные сложности адаптации метода применительно к этим территориям обусловлены в первую очередь ограниченным числом космических снимков из-за малого количества безоблачных дней в году, а также отсутствием карт соизмеримых масштабов для валидации получаемых распределений *ATI*.

Цель работы — оценка возможности картографирования теплофизических неоднородностей тундровых ландшафтов по данным космической съёмки в оптическом (видимом и тепловом) диапазоне длин волн.

#### Методика исследований

Неоднородности теплофизических свойств ПРП могут быть выражены через тепловую инерцию (Thermal Inertia, *TI*) (Negm et al., 2017; Song, Jia, 2016):

$$TI = \sqrt{\lambda C \rho} = C \rho \sqrt{a},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности; *С* — удельная теплоёмкость;  $\rho$  — плотность вещества; *а* — коэффициент температуропроводности. На основе бесконтактных измерений температуры поверхности в течение суток может быть рассчитан параметр *ATI*, характеризующий тепловую инерцию (Negm et al., 2017; Song, Jia, 2016; Van Doninck et al., 2011):

$$ATI = K \frac{1 - A}{\Delta T},$$

где A — альбедо поверхности;  $\Delta T$  — разница максимальных и минимальных значений температуры поверхности в суточном цикле; K — коэффициент, учитывающий условия инсоляции. При равных условиях внешнего теплового воздействия среда (тело) с более высокой ATIбудет характеризоваться более слабыми изменениями температуры на поверхности. В данном случае параметр ATI характеризует эффективные значения TI, поскольку анализируемый тундровый ПРП представляет собой многослойную среду. Под эффективной тепловой инерцией понимается тепловая инерция неоднородного почвенно-растительного покрова, эквивалентная тепловой инерции однородного покрова той же толщины, находящегося в идентичных условиях нестационарного теплового воздействия.

В настоящей работе используется безразмерный параметр  $ATI_N$  (Negm et al., 2017; Verstraeten et al., 2006), диапазон изменения которого лежит в пределах от 0 до 1:

$$ATI_{N_i} = \frac{ATI_i - ATI_{\min}}{ATI_{\max} - ATI_{\min}},$$

где  $ATI_{max}$  и  $ATI_{min}$  — максимальное и минимальное значения параметра; *i* — координаты пикселя в распределении  $ATI_N$ . Параметр  $ATI_N$  более универсален, поскольку ATI зависит от суточного перепада температуры поверхности, который, в свою очередь, зависит от метеоусловий. Ранее по данным полевых наблюдений была установлена связь между ATI и коэффициентом температуропроводности для четырёх различных типов тундрового ПРП, что свидетельствует о возможности характеристики теплофизических свойств покрова по параметрам ATI и  $ATI_N$  (Корниенко, 2018).

Картографирование теплофизических неоднородностей тундрового ПРП по параметру *ATI*<sub>N</sub> с использованием данных космической съёмки предполагает решение ряда методических задач. К их числу относится оптимизация времени и количества съёмок, их периодичности и детальности, оценка влияния системных и случайных факторов на распределения  $ATI_N$ , а также выбор алгоритмов обработки данных и методов валидации результатов. К системным (информативным) факторам могут быть отнесены геоморфологические, гидрологические и геоботанические изменения состояния ландшафта, обусловленные влиянием сезонных и многолетних природных факторов, а также антропогенным воздействием. К случайным факторам относятся различия пропускания атмосферы на момент съёмки, резкие и неравномерные по площади перепады температуры воздуха.

Для реализации метода могут быть использованы данные со спутников, осуществляющих мультиспектральную и тепловую съёмку в дневное и ночное время суток. В настоящей работе были использованы снимки летнего времени года со спутников NOAA и MetOp-A/B (радиометр AVHRR — Advanced Very High Resolution Radiometer), предоставленные в открытом доступе. Радиометр AVHRR имеет пять спектральных каналов, в том числе два — в дальней инфракрасной (тепловой) области спектра. Предварительная обработка данных включала отбор безоблачных снимков с приемлемыми углами съёмки, калибровку спектральных каналов, геометрическую коррекцию с приведением к проекции UTM (Universal Transverse Mercator, датум WGS-84), фрагментирование исследуемого района из исходного кадра. На этом этапе также осуществляется маскирование водных поверхностей с площадью, превышающей пространственное разрешение снимков. В данном случае для этой цели использовался спектральный индекс NDVI (Normalize Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) со значениями меньше нуля (Tucker, 1979). Расчёт температуры поверхности проводился по алгоритму «расщеплённого окна» (Ulivieri et al., 1994), что снижает влияние неравномерности пропускания атмосферы на момент съёмки. Коэффициенты излучения поверхности в 4-м и 5-м тепловых каналах радиометра AVHRR рассчитывались по формулам, предлагаемым в работе (Van de Griend, Owe, 1993). Расчёт альбедо (А) поверхности проводился по данным дневной съёмки с использованием алгоритма, приведённого в статье (Liang, 2000).

В большинстве случаев моменты съёмки не совпадают со временем достижения максимальных и минимальных значений температуры поверхности в суточном цикле. В этой связи разработаны различные алгоритмы, позволяющие рассчитать значение  $\Delta T$  по данным съёмок в любое время суток. Здесь расчёт  $\Delta T$  проводился по двум алгоритмам, первый из которых предполагает наличие данных четырёх и более съёмок в течение суток (Van Doninck et al., 2011). Преимущество этого алгоритма состоит в том, что он позволяет рассчитать  $\Delta T$  без привлечения каких-либо данных о времени максимальных и минимальных значений температуры поверхности, недостаток — в том, что не всегда удаётся получить четыре и более кондиционных сюжета в течение суток. Второй алгоритм позволяет рассчитать максимальный суточный перепад температуры поверхности  $\Delta T$  по данным двухразовой съёмки (Van Doninck et al., 2011), однако при расчётах необходимо знать время достижения максимальных значений температуры поверхности, которое устанавливается из априорных сведений, в том числе по данным метеостанций. В настоящей работе данные космической съёмки обрабатывались и анализировались с использованием программного комплекса ENVI 4.8.

### Район исследований и данные космической съёмки

Район исследований площадью около 20 000 км<sup>2</sup> расположен в центральной части п-ова Ямал и относится к северным субарктическим тундрам сплошного распространения многолетнемерзлых пород (*puc. 1*, см. с. 172). В районе осваиваются два крупнейших месторождения углеводородов: Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) и Харасавэйское газоконденсатное месторождение (ГКМ). Природные ландшафты этих территорий характеризуются существенной неоднородностью ПРП, занимающего до 90–95 % площади (без учёта водоёмов), густой сетью рек и озёр, в основном термокарстового происхождения, а также большим количеством болот.



*Рис. 1.* Схема расположения района исследования на п-ове Ямал

Район исследований относится к равнинным территориям, поверхности преимущественно плоские, углы наклона рельефа незначительные  $(0,5-1,5^\circ)$  (Вечная..., 2002). Растительность представлена в основном лишайниково-моховыми, кустарничково-моховыми, травяно-моховыми сообществами (Морозова, Магомедова, 2004). Напочвенный покров плотный, представлен мхами и лишайниками толщиной от 2 до 15 см. В растительном покрове преобладают травы высотой до 0,25 м и кустарники высотой до 0,7 м. Толщина слоя СКТ в среднем около 0,4 м (при вариациях температуры на нижней границе не более 0,1 °C).

В таблице приведены даты и местное время космических съёмок, данные которых использовались для построения распределений ATI<sub>N</sub>, минимальные и максимальные значения  $\Delta T$ , рассчитанные с доверительным интервалом 99 %, а также значения среднесуточной температуры воздуха (T<sub>в</sub>) на даты съёмки по данным метеостанции Марре-Сале (см. рис. 1). Пространственное разрешение снимков радиометра AVHRR составляет ~1,1 км, что позволяет строить тематические карты масштаба 1:1 500 000 и мельче. Спутники NOAA и MetOp-A/B обеспечивают съёмку территории до 10 раз в сутки, однако не все из сюжетов имеют приемлемый угол съёмки исследуемого района. Температурная чувствительность тепловых каналов AVHRR -0,1 K.

$ATI_N$	Спутник	Дата съёмки	Время съёмки	$\Delta T, \mathrm{K}$		T <sub>B</sub> , °C
				мин.	макс.	
$ATI_N(1)$	NOAA-18	20.07.2013	03:10	12,7	27,9	21,3
	NOAA-18	20.07.2013	05:55			
	NOAA-19	20.07.2013	10:32			
	NOAA-19	20.07.2013	13:11			
$ATI_N(2)$	NOAA-18	20.07.2013	03:10	12,0	29,0	
	NOAA-19	20.07.2013	13:11			
$ATI_N(3)$	MetOp-A	20.07.2013	11:18	5,4	26,6	
	MetOp-A	20.07.2013	20:29			
$ATI_N(4)$	MetOp-A	17.07.2013	11:35	1,8	26,5	16,6
	MetOp-A	17.07.2013	19:50			
$ATI_N(5)$	MetOp-B	21.07.2008	12:38	5,5	22,1	8,0
	MetOp-B	21.07.2008	20:25			
$ATI_N(6)$	MetOp-A	07.07.2016	11:33	3,5	24,7	22,4
	MetOp-B	07.07.2016	20:41			

Космические снимки, используемые для построения распределений ATI<sub>N</sub>

## Результаты картографирования параметра АТІ,

Для построения распределений параметра  $ATI_N$  с расчётом  $\Delta T$  по первому алгоритму использовались четыре сюжета в течение суток 20.07.2013. Для вычисления  $\Delta T$  по второму алгоритму дополнительно использовались срочные данные метеонаблюдений со станции Марре-Сале. На *puc. 2* приведены шесть вариантов распределений параметра  $ATI_N$  и их гистограмм, построенных по обоим алгоритмам в соответствии с данными о датах и времени съёмок (см. *таблицу*). Значения  $ATI_{max}$  и  $ATI_{min}$  определялись с доверительным интервалом 99 %. Распределение  $ATI_N$  (1) построено по первому алгоритму (см. *puc. 2a* и *таблицу*), остальные распределения — по второму алгоритму (см. *puc. 26–е* и *таблицу*). Распределения даются в единой для всех цветовой гамме из 10 градаций цвета, каждая из которых соответствует 10 % значений (площади) общего распределения. Достаточно высокая чувствительность тепловых изображений по температуре (0,1 K) и диапазон изменения  $\Delta T$  (см. *таблицу*) позволяют при необходимости увеличить число градаций.



*Рис. 2.* Распределения параметра  $ATI_N$ , построенные по данным радиометра AVHRR:  $a - ATI_N(1); \delta - ATI_N(2); s - ATI_N(3); z - ATI_N(4); \partial - ATI_N(5); e - ATI_N(6)$ 

Предварительное сравнение распределений  $ATI_N$  позволяет говорить о достаточно близком их сходстве и устойчивости расположения аномальных зон. В то же время отмечаются и некоторые различия в распределениях, что может быть связано как с системными информативными, так и случайными факторами влияния. Основная проблема валидации полученных результатов связана с отсутствием каких-либо данных, достоверно характеризующих теплофизические неоднородности ландшафтов таких крупных территорий. Наземные наблюдения с использованием эталонных средств контроля малоэффективны, поскольку в реальных условиях (в частности, в тундре) пространственная неоднородность распределений температуры, влажности, теплофизических свойств ПРП даже на небольших контрольных участках может быть соизмерима с их неоднородностью на всей исследуемой территории. Для получения представительной эталонной выборки *in situ* необходима установка большого числа автономных средств измерения (логгеров) на площади, в разы превышающей пространственное разрешение космического снимка, что чрезвычайно трудоёмко.

В ряде случаев для валидации распределений ATI используются данные космической съёмки в микроволновом диапазоне, характеризующие влажность почвы. В работе (Van Doninck et al., 2011) для этой цели были взяты данные сканирующего радиометра AMSR-E спутника AQUA. Основной недостаток применения данных подобного типа — в их низком пространственном разрешении (25 км). Альтернативный подход определения распределений  $ATI_N$  с минимальным влиянием случайных факторов предполагает поиск наиболее близких пар распределений разных дат съёмки, поскольку случайные факторы непостоянны во времени. Для определения наиболее близких пар распределений  $ATI_N$  могут быть использованы диаграммы рассеяния и значения среднеквадратических отклонений (СКО). В качестве примера на *рис. За*-*д* приведены диаграммы рассеяния различных пар распределений  $ATI_N$ , а также диаграмма, характеризующая связь распределений  $ATI_N$  (3) и индекса NDVI (*puc. 3e*).



*Рис. 3.* Диаграммы рассеяния распределений:  $a - ATI_N(1)$  и  $ATI_N(2)$ ;  $\delta - ATI_N(2)$  и  $ATI_N(3)$ ;  $s - ATI_N(3)$  и  $ATI_N(4)$ ;  $c - ATI_N(3)$  и  $ATI_N(5)$ ;  $\partial - ATI_N(3)$  и  $ATI_N(6)$ ;  $e - ATI_N(3)$  и NDVI

Сравнение диаграмм и СКО показывает, что минимальные расхождения отмечаются между распределениями  $ATI_N$  (1) и  $ATI_N$  (2) (см. *рис. 3a*). Данный факт свидетельствует, что

выбор алгоритма в данном случае не столь существенно влияет на распределение  $ATI_N$  в отличие от выбора времени съёмок (диаграмма на *рис. 36*). Отсюда следует, что второй алгоритм более приемлем, поскольку его применение позволяет обобщить существенно большее количество распределений  $ATI_N$  и, соответственно, повысить достоверность конечного результата.

Расхождения между распределениями  $ATI_N$  разных дат съёмок (см. *рис. 3в–д*) несколько выше, чем для одной даты (см. *рис. 3a*, *б*). В данной ситуации следует принимать во внимание вероятность влияния как системных, так и случайных факторов. Для распределения  $ATI_N$  (4) использовались данные съёмки, проводимой тремя днями ранее съёмки для расчёта  $ATI_N$  (3) (см. *таблицу*). Дождей в этот период не наблюдалось и гидрологическая ситуация не менялась, поскольку к этому времени сезон паводков уже прошёл (Kornienko, 2016). Причина расхождений  $ATI_N$  (3) и  $ATI_N$  (4), скорее всего, связана с резким изменением погодных условий. По данным метеонаблюдений, с 15 по 20 июля 2013 г. среднесуточная температура воздуха в этом районе поднялась на 10 °C.

Разброс значений и СКО диаграммы рассеяния  $ATI_N$  (3) и  $ATI_N$  (5) (см. *рис. 3г*) несколько выше, чем у других пар распределений (см. *рис. 36*, *д*), что может быть связано с аномально низким значением температуры воздуха в день съёмки 21.07.2008 (см. *таблицу*). Распределение  $ATI_N$  (6) получено по данным съёмок 07.07.2016, т.е. по времени развития сезонных процессов на две недели раньше съёмки 20.07.2013, данные которой использовались для расчёта  $ATI_N$  (3). Диаграмма рассеяния и СКО этих распределений (см. *рис. 36*, *г*). Отличие  $ATI_N$  (6) от  $ATI_N$  (3) в основном выражается в более высоких значениях  $ATI_N$  (6) в южной части района (см. *рис. 2e*, *в*). Среднесуточные температуры воздуха и погодные условия на даты обеих съёмок практически одинаковы. В данном случае возможно влияние изменений гидрологической ситуации, поскольку период паводков, как правило, заканчивается не раньше, чем к середине июля. В данном районе скорость схода талых вод неодинакова — в его южной части она медленнее, чем в северной (Когпienko, 2016), и, возможно, картина распределения  $ATI_N$  (6) отражает ситуацию, связанную с сезонными гидрологическими процессами.

На диаграмме *рис. Зе* отмечается характерная для обводнённых районов тундры обратная зависимость распределений NDVI и  $ATI_N$  (3), построенных по данным съёмки 20.07.2013. Поскольку водные поверхности имеют более низкие значения индекса NDVI и более высокие значения параметра  $ATI_N$  по сравнению с ПРП, то увеличение доли мелких (немаскированных) водных объектов приводит к снижению NDVI и повышению  $ATI_N$ .

#### Обсуждение результатов

Очевидно, что при картографировании теплофизических неоднородностей покрова по данным дистанционного зондирования Земли полностью исключить влияние случайных факторов невозможно и даже при неизменном его состоянии при повторных съёмках распределения  $ATI_N$  будут иметь расхождения. В этой связи при анализе данных важно определить уровень допустимых расхождений между распределениями  $ATI_N$ , позволяющий считать полученный результат приемлемым для характеристики теплофизических неоднородностей покрова. Одним из критериев близкого (приемлемого) соответствия распределений  $ATI_N$  могут быть значения СКО диаграммы на *рис. Зб*, поскольку распределения  $ATI_N$  (2) и  $ATI_N$  (3) рассчитаны по одному алгоритму, на основе данных одного и того же дня, что практически исключает влияние случайных (метеорологических) факторов. Расхождения в данном случае обусловлены различиями во времени съёмки и, что неизбежно для любых сравниваемых пар, погрешностями географической привязки космических снимков.

Несмотря на некоторые различия в распределениях  $ATI_N$  (см. *рис.* 2), в целом отмечается их достаточно близкое сходство, что свидетельствует о практической возможности применения данного подхода для картографирования теплофизических неоднородностей ПРП тундровых ландшафтов. Распределения  $ATI_N$ , полученные по данным AVHRR разных дат и лет съёмки, имеют неслучайный характер и могут анализироваться в комплексе с другими данными, картами и параметрическими моделями исследуемого района. В качестве примера может быть проведено сопоставление распределения параметра  $ATI_N$  (1) и карты геоморфологических уровней (м-б 1:500 000) п-ова Ямал (*рис. 4*) (Крицук, Дубровин, 2003). На изображении  $ATI_N$  (1) контурами обозначены границы лайд и поймы рек, отделяющие их от террас разного уровня. Гистограмма распределения  $ATI_N$  (1), также как гистограммы других аналогичных распределений (см. *рис. 2*), имеет ассиметричный, бимодальный характер. Участки лайды и поймы рек характеризуются более высокими значениями  $ATI_N$  с низкой модой и более высокой дисперсией. На участках террас разного уровня значения  $ATI_N$  существенно ниже, распределения здесь характеризуются высокой модой и более низкой дисперсией.



*Рис.* 4. Сопоставление распределения  $ATI_N(a)$  с картой геоморфологических уровней (б)

На *рис. 5* приведены средние значения и планки погрешностей, характеризующие СКО распределения  $ATI_N$  (1) для шести геоморфологических уровней, определяемых в основном по изогипсам. Максимальные высотные таксоны соответствуют IV ( $\delta$ ) террасе. По мере повышения уровня (от лайды к IV террасе) средние значения  $ATI_N$  и СКО снижаются, что в первую очередь связано с уменьшением количества мелких водных объектов. В то же время вид-



но (см. *рис.* 4), что в границах одних и тех же геоморфологических уровней значения  $ATI_N$  могут существенно различаться. С другой стороны, одинаковые значения  $ATI_N$  попадают в границы разных геоморфологических уровней.

*Рис. 5.* Вариации средних значений и СКО распределения *ATI<sub>N</sub>* (1) в границах различных геоморфологических уровней: 1 — лайда; 2 — пойма; 3 — I–II террасы; 4 — III терраса; 5 — IV (а) терраса; 6 — IV (б) терраса

В частности, аномально низкие значения  $ATI_N$  на севере Харасавэйского ГКМ, относящиеся к III террасе, также прослеживаются в границах IV террасы разных подуровней. Очевидно, что в комплексе с различными картографическими материалами и моделями, характеризующими особенности территорий, распределения  $ATI_N$  могут нести дополнительную информацию о строении и состоянии криогенных тундровых ландшафтов.

#### Заключение

В настоящей работе приведены предварительные результаты картографирования теплофизических неоднородностей тундрового ПРП территории центральной части п-ова Ямал по нормированным распределениям «кажущейся тепловой инерции» (ATI<sub>N</sub>), построенным на основе данных радиометра AVHRR. Сопоставление распределений параметра ATI<sub>N</sub>, рассчитанного по алгоритмам с четырьмя и двумя измерениями в течение суток, показало их практически полную идентичность. Сравнительный анализ нескольких распределений ATI<sub>N</sub>, вычисленных по данным разных дат съёмки, свидетельствует об их неслучайном характере и практической возможности их использования для картографирования теплофизических неоднородностей ПРП слоя СКТ территорий арктических и субарктических тундр. В качестве критерия допустимых (приемлемых) расхождений распределений ATI<sub>N</sub>, связанных с влиянием случайных факторов, предлагается использовать значение СКО диаграммы рассеяния двух распределений, построенных по данным съёмки одного и того же дня, но разного времени суток. Параметр *ATI*<sub>N</sub> на качественном уровне характеризует теплофизические свойства ПРП, также как и коэффициент температуропроводности. Максимальными теплоизоляционными свойствами обладают покровы с минимальными значениями параметра ATI<sub>N</sub>. Тундровый ПРП с низкой *ATI*<sub>N</sub> в большей степени подвержен опасности возгорания в жаркие дни, поскольку, как правило, содержит меньшее количество влаги, что в первую очередь относится к моховому и лишайниковому напочвенному покрову. Создание картографических моделей теплофизических неоднородностей криогенных тундровых ландшафтов в региональных масштабах предполагает проведение дополнительных исследований и анализа большего числа разновременных космических снимков, что в перспективе позволит повысить достоверность картографирования за счёт увеличения числа распределений ATI<sub>N</sub> и минимизации влияния случайных факторов.

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

### Литература

- 1. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
- 2. Гаврильев Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: справоч. пособие. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 146 с.
- 3. Корниенко С. Г. Изучение и моделирование неоднородностей теплофизических свойств тундрового почвенно-растительного покрова по данным наземных наблюдений и космической съемки // 16-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»: сб. тез. Москва. 12–16 нояб. 2018. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 413.
- 4. *Крицук Л. Н., Дубровин В.А.* Карты геокриологического районирования как основа геоэкологической оценки осваиваемой территории криолитозоны // Разведка и охрана недр. 2003. № 7. С. 12–15.
- 5. *Морозова Л. М., Магомедова М. А.* Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2004. 63 с.
- 6. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
- 7. *Пендин В. В., Ганова С. Д.* Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.

- 8. *Kornienko S. G.* Analysis of Errors in Estimating Changes in Water Body Areas by Satellite Data: Case Study of Thermokarst Lakes in Yamal Peninsula // Water Resources. 2016. V. 43. No. 6. P. 180–191.
- 9. *Liang Sh.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms // Remote Sensing of Environment. 2000. V. 76. P. 213–238.
- Negm A., Capodici F., Ciraolo G., Maltese A., Provenzano G., Rallo G. Assessing the Performance of Thermal Inertia and Hydrus Models to Estimate Surface Soil Water Content // Applied Sciences. 2017. V. 7. 975. DOI: 10.3390/app7100975.
- Ramakrishnan D., Bharti R., Singh K. D., Nithya M. Thermal inertia mapping and its application in mineral exploration: results from Mamandur polymetal prospect, India // Geophysical J. Intern. 2013. V. 195(1). P. 357–368. DOI: 10.1093/gji/ggt237.
- 12. Schieldge J. P., Kahle A. B., Alley R. E., Gillespie A. R. Use of thermal inertia properties for material identification // SPIE Image Processing for Missile Guidance. 1980. V. 238. P. 350–357. URL: https://gis.ess. washington.edu/keck/Publications/Use%20of%20thermal-inertia%20properties%20for%20material%20 identification.pdf.
- 13. *Song C., Jia L.* A Method for Downscaling FengYun-3B Soil Moisture Based on Apparent Thermal Inertia // Remote Sensing. 2016. V. 8. 703. DOI: 10.3390/rs8090703.
- 14. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. P. 127–150.
- 15. Ulivieri C., Castronuovo M. M., Francioni R., Cardillo A. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites // Advances in Space Research. 1994. V. 14(3). P. 59–65.
- 16. *Van de Griend A.A., Owe M.* On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces // Intern. J. Remote Sensing. 1993. V. 14. No. 6. P. 1119–1131.
- 17. *Van Doninck J.*, *Peters J.*, *Baets B. D.*, *Clercq E. M.*, *Ducheyne E.*, *Verhoest N. E. C.* The potential of multitemporal Aqua and Terra MODIS Apparent Thermal Inertia as a soil moisture indicator // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. V. 13. P. 934–941.
- Verstraeten W. W., Veroustraete F., Van der Sande C. J., Grootaers I., Feyen J. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 101. P. 299–314.

## Mapping thermally heterogeneous tundra landscapes from satellite data: a case study of the Yamal Peninsula

#### S.G. Kornienko

#### Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 119333, Russia E-mail: spaceakm2@ogri.ru

The thermal and insulation properties of tundra landscapes control the parameters of permafrost, especially the active layer thickness (seasonal thaw and freezing depths). Experimental results suitable for the mapping of the tundra land cover thermal properties have been very limited so far. The possibility to map the thermally heterogeneous tundra land cover within the layer of diurnal temperature variations using normalized distributions of apparent thermal inertia  $(ATI_N)$  has been considered for the first time in this study for the case of the central Yamal Peninsula. The reported results include comparison of  $ATI_N$  distributions calculated from NOAA and MetOp-A/B (AVHRR scaner) data with the use of two different algorithms. Analysis of several  $ATI_N$  distributions retrieved from images of different years and dates shows that they are not random and are applicable to map the thermal field of the Arctic and Subarctic tundras. The allowable misfit between different  $ATI_N$  distributions caused by the effect of random factors is estimated using the criterion of root mean square deviation (RSMD) in the scattering pattern of two distributions based on scenes of the same date but different time of day. The average values and RSMD of  $ATI_N$  generally decrease as the geomorphological levels heighten from layda and floodplain to marine terraces.

Keywords: remote sensing, apparent thermal inertia, mapping, land cover, tundra

Accepted: 24.10.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-169-179

### References

- 1. *Vechnaya merzlota i osvoenie neftegazonosnykh raionov* (Permafrost and oil and gas development), E. S. Melnikova, S. E. Grechishcheva (eds.), Moscow: GEOS, 2002, 402 p.
- 2. Gavril'ev R. I., *Teplofizicheskie svoistva komponentov prirodnoi sredy v kriolitozone:* (Thermophysical properties of the components of the natural environment in the permafrost zone), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2004, 146 p.
- Kornienko S. G., Izuchenie i modelirovanie neodnorodnostei teplofizicheskikh svoistv tundrovogo pochvennorastitel'nogo pokrova po dannym nazemnykh nablyudenii i kosmicheskoi s"emki (Study and modeling of heterogeneities of the thermophysical properties of the tundra soil and vegetation cover according to groundbased observations and satellite imagery), 16-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (16<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of abstracts, Moscow, 12–16 Nov. 2018, Moscow: IKI RAN, 2018, p. 413.
- Kritsuk L. N., Dubrovin V.A., Karty geokriologicheskogo raionirovaniya kak osnova geoekologicheskoi otsenki osvaivaemoi territorii kriolitozony (Maps of geocryological zoning as the basis of the geoecological assessment of the developed territory of the permafrost zone), *Razvedka i okhrana nedr*, 2003, No. 7, pp. 12–15.
- 5. Morozova L. M., Magomedova M. A., *Struktura rastitel'nogo pokrova i rastitel'nye resursy poluostrova Yamal* (Land cover structure and plant resources of the Yamal Peninsula), Ekaterinburg: Izd. Ural'skogo universiteta, 2004, 63 p.
- 6. Pavlov A. V., Teplofizika landshaftov (Thermophysics of landscapes), Novosibirsk: Nauka, 1979, 284 p.
- 7. Pendin V.V., Ganova S.D., *Geoekologicheskii monitoring territorii raspolozheniya ob"ektov transporta gaza v kriolitozone* (Geoecological monitoring of territories of location of objects of transport of gas in the permafrost zone), Moscow: OAO PNIIIS, 2009, 236 p.
- 8. Kornienko S. G., Analysis of Errors in Estimating Changes in Water Body Areas by Satellite Data: Case Study of Thermokarst Lakes in Yamal Peninsula, *Water Resources*, 2016, Vol. 43, No. 6, pp. 180–191.
- 9. Liang Sh., Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2000, Vol. 76, pp. 213–238.
- Negm A., Capodici F., Ciraolo G., Maltese A., Provenzano G., Rallo G., Assessing the Performance of Thermal Inertia and Hydrus Models to Estimate Surface Soil Water Content, *Applied Sciences*, 2017, Vol. 7, 975, DOI: 10.3390/app7100975.
- 11. Ramakrishnan D., Bharti R., Singh K. D., Nithya M., Thermal inertia mapping and its application in mineral exploration: results from Mamandur polymetal prospect, India, *Geophysical J. Intern.*, 2013, Vol. 195(1), pp. 357–368, DOI: 10.1093/gji/ggt237.
- 12. Schieldge J. P., Kahle A. B., Alley R. E., Gillespie A. R., Use of thermal inertia properties for material identification, *SPIE Image Processing for Missile Guidance*, 1980, Vol. 238, pp. 350–357, available at: https:// gis.ess.washington.edu/keck/Publications/Use%20of%20thermal-inertia%20properties%20for%20material%20identification.pdf.
- 13. Song C., Jia L., A Method for Downscaling FengYun-3B Soil Moisture Based on Apparent Thermal Inertia, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, 703, DOI:10.3390/rs8090703.
- 14. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, pp. 127–150.
- 15. Ulivieri C., Castronuovo M. M., Francioni R., Cardillo A., A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites, *Advances in Space Research*, 1994, Vol. 14(3), pp. 59–65.
- 16. Van de Griend A.A., Owe M., On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces, *Intern. J. Remote Sensing*, 1993, Vol. 14, No. 6, pp. 1119–1131.
- Van Doninck J., Peters J., Baets B. D., Clercq E. M., Ducheyne E., Verhoest N. E. C., The Potential of Multitemporal Aqua and Terra MODIS Apparent Thermal Inertia as a Soil Moisture Indicator, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, Vol. 13, pp. 934–941.
- 18. Verstraeten W.W., Veroustraete F., Van der Sande C.J., Grootaers I., Feyen J., Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, pp. 299–314.