

## Спектральный портрет равнинных ландшафтов России

Т. Б. Титкова, А. Н. Золотокрылин, В. В. Виноградова

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*  
*E-mails: titkova@igras.ru, zolotokrylin@igras.ru, vvinog@yandex.ru*

Проведено комплексное исследование спектральных характеристик основных типов равнинных ландшафтов России. По данным спектрорадиометра MODIS показан характер изменений спектральных характеристик в зависимости от широты. Даны количественные характеристики альbedo, температуры поверхности  $T_s$  и индекса NDVI на равнинах Европейской части России и Западной Сибири. Изучены связи спектральных характеристик поверхности с типами зональных равнинных ландшафтов. Существует определённый диапазон спектральных характеристик, соответствующих каждой зоне. Корреляция альbedo и температуры поверхности может быть как положительной, так и отрицательной. Температура поверхности положительно коррелирует с альbedo в материковой тундре на профилях  $45^\circ$  и  $55^\circ$  в.д. и отрицательно в тундре арх. Новая Земля, о. Вайгач и материковой тундре на профиле  $70^\circ$  в.д. Значимая положительная корреляция альbedo с температурой поверхности прослеживается в лесотундре, тайге (за исключением части северотаёжной зоны), степи и полупустыне. По отдельным спектральным параметрам соседние зоны могут быть близки, но по совокупности спектральных свойств каждая ландшафтная зона индивидуальна. Показаны межзональные различия спектральных свойств и оценена теснота связей спектральных компонентов в каждой зоне. В большинстве случаев, за исключением севера, связь температуры поверхности с NDVI отрицательна и усиливается при продвижении с севера на юг. Формирование положительной связи  $T_s$ —NDVI в тундре и местами в лесотундре может свидетельствовать о возрастающей роли растительного компонента при потеплении.

**Ключевые слова:** MODIS, альbedo, температуры поверхности, NDVI, равнинные ландшафты

Одобрена к печати: 17.04.2020  
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126

### Введение

Ландшафт представляет собой соподчинённую систему. В нём идёт постоянный обмен веществом и энергией под воздействием климатических изменений и антропогенных процессов. Любые изменения вызывают преобразования ландшафта и меняют его спектральные характеристики.

Исследование спектральных свойств природных ландшафтов становится важным элементом для комплексного изучения природной среды. Многозональная космическая съёмка позволяет получить спектральные образы компонентов ландшафтов по таким признакам, как их тепловое состояние, влажность, цвет, и обобщить их в спектральном портрете.

С оптической точки зрения ландшафт представляет собой совокупность элементов, различающихся по цвету и яркости. Альbedo природных объектов (почв, горных пород, растительности) сравнительно устойчиво и может изменяться в основном за счёт условий увлажнения. В работах (Саидов, 2012; Титкова, Виноградова, 2015) были предприняты попытки классификации ландшафтов по коэффициентам спектральной яркости.

Цвет и яркость растительности изменяются и во времени, и в пространстве. В исследованиях (Дьяконов и др., 2017; Титкова, Виноградова, 2019) показана высокая информативность нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) как индикатора пространственно-временной организации растительного покрова.

Температура поверхности является одним из ключевых параметров при изучении эколого-климатической обстановки территорий, где она может варьироваться в зависимости от климата, альbedo, видов поверхности и типов растительности (Куулар, 2018).

Следовательно, по набору таких показателей, как альbedo, температура поверхности, NDVI, а также их взаимосвязи возможно составить спектральный портрет ландшафта в заданный момент времени. Таким образом, исследуемый ландшафт может быть представлен определённой совокупностью спектральных свойств со своим сочетанием спектральных характеристик. Но это не исключает сходство ландшафтов по какому-либо спектральному параметру.

Анализ накопленных спектральных характеристик поверхности в разных природных зонах свидетельствует о конкуренции трёх факторов регулирования температуры подстилающей поверхности: радиационного (альбедного), эвапотранспирационного и аэродинамического (Becker et al., 1988). *Радиационный (альбедный)* механизм можно описать следующим образом: если альbedo поверхности увеличивается, то поглощённая поверхностью радиационная энергия уменьшается, вызывая уменьшение температуры поверхности, и наоборот. *Эвапотранспирационный* механизм: если альbedo поверхности увеличивается, а это бывает при угнетении и изреживании растительного покрова в период длительного дефицита осадков или при антропогенном воздействии, то величина эвапотранспирации уменьшается, что ведёт к повышению температуры поверхности; и наоборот. Эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности тесно связано с аэродинамическим регулированием через параметр шероховатости. *Аэродинамический* механизм: если плотность низкого растительного покрова (травостой, кустарники) уменьшается, то поверхность становится ровнее (снижается параметр шероховатости). Это уменьшает вертикальные потоки явного и скрытого тепла, что повышает температуру поверхности в дневные часы.

Альбедное регулирование температуры поверхности доминирует в аридных ландшафтах с пустынной растительностью и выражается отрицательной корреляцией между альbedo и температурой поверхности. Повышение альbedo поверхности сопровождается падением её температуры, снижением конвекции, уменьшением облачности и в результате — уменьшением частоты и количества конвективных (региональных) осадков. С помощью отрицательной корреляции альbedo и температуры поверхности выделялись, например, затрагиваемые климатическим опустыниванием аридные земли Северо-Западного Прикаспия (Золотокрылин, 2003; Золотокрылин, Титкова, 2011).

Эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности с положительной корреляцией альbedo и температуры поверхности начинает доминировать в субгумидных ландшафтах в результате смены пустынных видов растений степными. В этих районах заметная часть поглощённого поверхностью радиационного тепла тратится на транспирацию и испарение. В итоге в случае увеличения альbedo поверхности (засуха) возрастает и её температура (между ними возникает положительная корреляция), так как часть тепла, тратившегося на транспирацию, переключается на турбулентный прогрев приземного слоя атмосферы.

Работа нацелена на выделение зональных ландшафтов с доминированием радиационного или эвапотранспирационного регулирования температуры поверхности на заданных профилях в среднем за многолетний период и в аномальные годы (засуха).

Проведено комплексное исследование спектральных характеристик основных типов равнинных ландшафтов России с иллюстрацией межзональных различий спектральных свойств (альbedo, температура поверхности, NDVI) и с оценкой устойчивости связей спектральных компонентов.

Новизна работы состоит в получении спектрального портрета равнинных ландшафтов России по данным спектрорадиометра MODIS в условиях современного потепления и антропогенных изменений, а также в демонстрации возможности оценки изменений спектральных особенностей территории в аномальные в климатическом отношении годы.

## Данные и методика исследования

Исследования проводились для равнинных ландшафтов Европейской части России и Западной Сибири, которые изменяются с севера на юг от тундровых до полупустынных и пустынных (рис. 1, см. с. 119) (Национальный..., 2007).

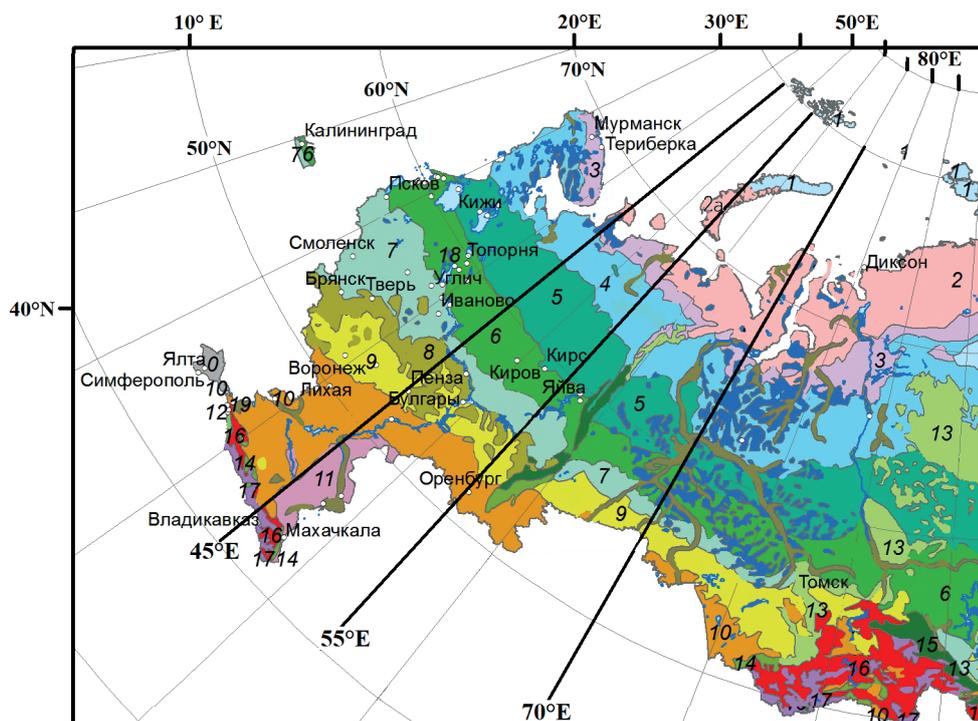


Рис. 1. Фрагмент ландшафтной карты России (Национальный..., 2007) с рассматриваемыми меридианами: 45, 55, 70° в. д. Ландшафты: 0 — нет данных; 1 — арктические; 2 — тундровые; 2а — тундра арх. Новая Земля; 3 — лесотундровые; 4 — северотаёжные; 5 — среднетаёжные; 6 — южнотаёжные; 7 — подтаёжные; 8 — широколиственно-лесные; 9 — лесостепные; 10 — степные типичные и сухостепные; 11 — полупустынные и пустынные; 12 — субсредиземноморские; 13 — низкоргорные бореальные; 14 — низкоргорные суббореальные; 15 — среднегорные бореальные; 16 — среднегорные суббореальные; 17 — высокогорные ландшафты; 18 — болота

Спектральные свойства ландшафтов оценивались по долготным профилям 45, 55, 70° в. д. за период 2000–2019 гг. для июля по спутниковым данным MODIS. Такой выбор профилей максимально полно охватывает все типы равнинных растительных сообществ. Использовались следующие параметры: вегетационный индекс (NDVI), альbedo поверхности ( $A_l$ ) и температура поверхности ( $T_s$ ). Обработка массивов проводилась в пакетном анализе MatLab. Рассматривались все значения пикселей, приходящиеся на исследуемые профили, которые разбивались по ландшафтным зонам. Для получения устойчивой многолетней спектральной картины рассчитывались средние величины по ландшафтным зонам за 20-летний период (2000–2019). Внутри каждой ландшафтной зоны определялась степень связи параметров.

Анализ NDVI проводился по модели MOD13C2 версии 6 для среднемесячных значений с разрешением сетки моделирования климата CMG (*англ.* Climate Modeling Grid)  $0,05 \times 0,05^\circ$  (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>). Ежемесячный продукт принимает все продукты MOD13A2, которые перекрывают месяц, и использует средневзвешенное временное значение. Глобальные данные MOD13C1 представляют собой безоблачные пространственные композиты.

Альbedo поверхности — это данные модели MCD43C1, версия 6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c1v006/>). Функция двунаправленного распределения отражения и набор параметров модели Albedo (BRDF / Albedo) производятся ежедневно с использованием 16-дневных данных спутников Terra и Aqua спектро радиометра MODIS с разрешением CMG  $0,05 \times 0,05^\circ$ . Данные альbedo использовались для середины месяца с 7 по 25 июля.

Температура поверхности анализировалась по модели MOD11C3 версии 6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/>), которая обеспечивает ежедневные значения для Земли и коэффициента излучения (LST — Land surface temperature и E) с разрешением  $0,05 \times 0,05^\circ$ .

Значения LST и E в продукте MOD11C3 получены усреднением значений из соответствующего месяца ежедневных файлов MOD11C1.

Для табл. 2 порог 5%-й статистической значимости определён по критерию Стьюдента, рассчитанного по парам значений, входящих в конкретную ландшафтную зону (Пановский, Брайер, 1972).

## Анализ результатов

### Спектральные характеристики ландшафтов

В табл. 1 представлена совокупность спектральных характеристик для каждого ландшафта по трём рассматриваемым профилям на равнинных территориях. Каждый профиль состоит из индивидуального набора ландшафтных зон со своим диапазоном значений спектральных характеристик. В целом для всех профилей значения спектральных параметров для конкретного равнинного ландшафта достаточно близки, что позволяет определить диапазон характерных значений спектральных свойств ландшафтных зон.

Характер изменения среднего альbedo с увеличением широты имеет вид неправильной параболы (рис. 2а). Альbedo от больших значений в полупустынной и пустынной зонах (0,22–0,33) уменьшается в среднетаёжной зоне (0,12–0,13) и вновь возрастает в материковой и островной тундровой (0,17–0,18) (табл. 2). Наибольшие изменения значений альbedo наблюдаются в подтаёжных ландшафтах (0,14–0,17) (см. табл. 2). В соседних подтаёжной и широколиственно-лесной зонах диапазоны альbedo перекрываются (0,17).

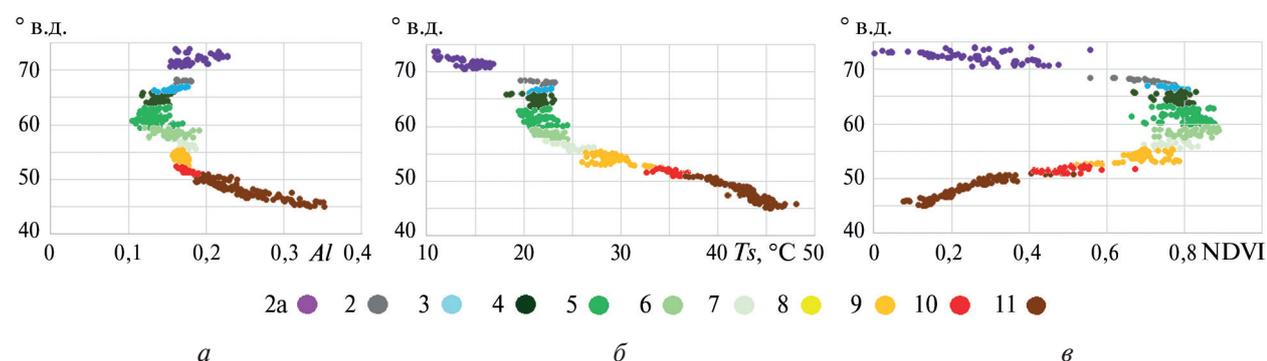


Рис. 2. Спектральные характеристики ландшафтов и их изменение с широтой по меридиану 55° в.д.: а — альbedo ( $Al$ ), б — температура поверхности ( $T_s$ ), в — NDVI. Ландшафтные зоны см. на рис. 1

Средняя температура поверхности увеличивается с широтой с севера на юг с нарушением линейности (рис. 2б). Температура  $T_s$  изменяется от 19 °C в материковых тундровых ландшафтах до 43 °C в полупустынных и пустынных (см. табл. 2). От лесотундровой до южнотаёжной зоны температура поверхности практически одинакова и составляет в среднем 21–23 °C. Скорость повышения  $T_s$  возрастает в лесостепной зоне, южнее она увеличивается с широтой почти линейно.

Изменения вегетационного индекса с широтой достаточно хорошо можно аппроксимировать параболой (рис. 2в). В тундре наблюдается наибольший разброс NDVI (0,5–0,7). В таёжной зоне значения NDVI наибольшие и находится в пределах 0,7–0,85 (см. табл. 2). Максимум NDVI достигает в южнотаёжной зоне (0,8–0,85) и затем опять уменьшается до 0,2 в пустынных ландшафтах. В среднем изменения значений NDVI в пределах ландшафтных зон не превышают 0,1.

Таким образом, по отдельным спектральным характеристикам ландшафты соседних зон могут быть очень близки, но по совокупности спектральных свойств каждая ландшафтная зона индивидуальна.

Таблица 1. Значения средних спектральных характеристик ландшафтов и их стандартное отклонение по долготным профилям (45, 55, 70° в. д.)

| Ландшафтная зона               | Al        |           |           | Ts       |          |          | NDVI      |           |           |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 45°       | 55°       | 70°       | 45°      | 55°      | 70°      | 45°       | 55°       | 70°       |
| Тундра арх. Новая Земля        |           | 0,21±0,08 |           |          | 11,8±3,6 |          |           | 0,27±0,12 |           |
| Тундровая                      | 0,18±0,01 | 0,17±0,03 | 0,18±0,02 | 20,2±1,2 | 22,0±1,2 | 18,9±1,8 | 0,72±0,02 | 0,70±0,06 | 0,53±0,06 |
| Болота                         | 0,13±0,05 |           |           | 20,1±0,8 |          |          | 0,63±0,14 |           |           |
| Лесотундровая                  | 0,14±0,02 | 0,16±0,01 | 0,15±0,03 | 21,1±1,5 | 21,8±0,7 | 22,0±1,9 | 0,69±0,03 | 0,77±0,02 | 0,69±0,07 |
| Северотаёжная                  | 0,14±0,01 | 0,14±0,01 | 0,14±0,02 | 21,2±0,5 | 21,2±0,9 | 22,5±0,7 | 0,76±0,04 | 0,77±0,04 | 0,70±0,04 |
| Среднетаёжная                  | 0,13±0,01 | 0,13±0,01 | 0,12±0,02 | 21,1±0,7 | 21,3±1,1 | 21,0±1,0 | 0,81±0,04 | 0,80±0,05 | 0,78±0,08 |
| Южнотаёжная                    | 0,14±0,03 | 0,15±0,02 | 0,14±0,01 | 21,6±0,7 | 22,5±1,0 | 22,3±1,0 | 0,85±0,02 | 0,82±0,05 | 0,79±0,05 |
| Подтаёжная                     | 0,14±0,01 | 0,17±0,02 | 0,17±0,00 | 23,5±0,7 | 24,0±1,9 | 23,4±0,7 | 0,82±0,04 | 0,74±0,07 | 0,82±0,02 |
| Широколиственно-лесная         | 0,17±0,01 |           |           | 26,3±1,1 |          |          | 0,73±0,04 |           |           |
| Лесостепная                    | 0,17±0,00 | 0,17±0,01 | 0,17±0,00 | 28,9±1,5 | 29,3±1,9 | 23,8±0,9 | 0,69±0,05 | 0,69±0,06 | 0,80±0,04 |
| Степная типичная и сухостепная | 0,18±0,01 | 0,18±0,01 | 0,17±0,02 | 33,7±2,4 | 34,8±2,2 | 30,3±3,1 | 0,53±0,11 | 0,51±0,08 | 0,56±0,13 |
| Полупустынная и пустынная      | 0,22±0,02 | 0,25±0,05 |           | 41,9±3,5 | 42,7±2,4 |          | 0,33±0,09 | 0,23±0,09 |           |

### Связь спектральных характеристик по ландшафтным зонам

По тесноте связи спектральных параметров мы можем судить об устойчивости спектральных свойств ландшафта к колебаниям климата и антропогенной нагрузке.

Корреляция альбедо и температуры поверхности в разных ландшафтах может быть как положительной, так и отрицательной (рис. 3а, табл. 2). Температура поверхности положительно коррелирует с альбедо в материковой тундре на профилях 45 и 55° в. д. и отрицательно — в тундре арх. Новая Земля, о. Вайгач и материковой тундре на профиле 70° в. д., где растительность встречается на каменистых поверхностях. Здесь отрицательная корреляция объясняется доминированием радиационного (альбедного) механизма регулирования температуры поверхности по отношению к эвапотранспирационному.

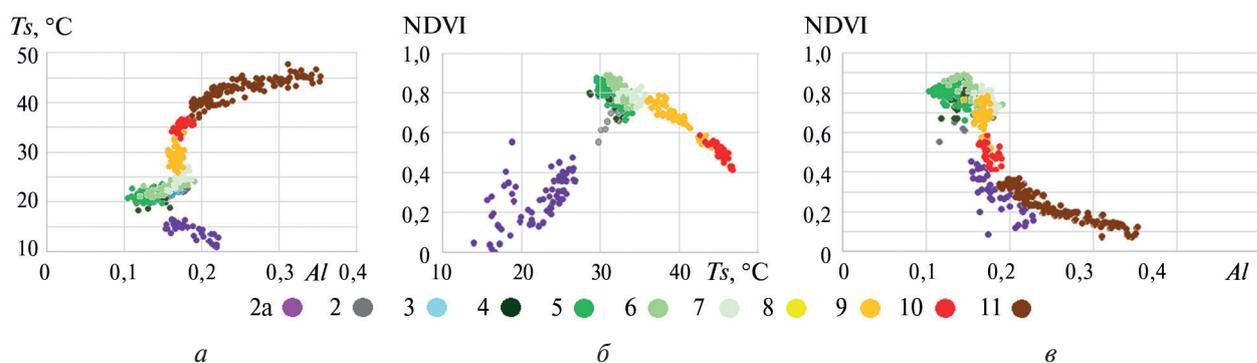


Рис. 3. Связь спектральных характеристик в ландшафтных зонах: а — альбедо (Al) с температурой поверхности (Ts); б — температура поверхности (Ts) с NDVI; в — альбедо (Al) с NDVI. Ландшафтные зоны см. на рис. 1

Таблица 2. Линейный регрессионный анализ связи спектральных характеристик равнинных ландшафтов на трёх меридианах (45, 55, 70° в. д.)

| Ландшафтная зона               | Связь параметров    |                     |                     |                      |                       |                      |                      |                      |                     |           |  |  |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------|--|--|
|                                | Al c Ts             |                     |                     | Ts c NDVI            |                       |                      | Al c NDVI            |                      |                     |           |  |  |
|                                | 45° в. д.           | 55° в. д.           | 70° в. д.           | 45° в. д.            | 55° в. д.             | 70° в. д.            | 45° в. д.            | 55° в. д.            | 70° в. д.           |           |  |  |
| Тундра арх. Новая Земля        |                     | Al = 24,0 – 58,3 Ts |                     |                      | Ts = 0,02 + 0,01 NDVI |                      |                      | Al = 0,8 – 3,0 NDVI  |                     | 70° в. д. |  |  |
| Тундровая                      | Al = 15,7 + 27,5 Ts | Al = 13,7 + 50,5 Ts | Al = 25,6 – 37,5 Ts | Ts = 0,7 + 0,00 NDVI | Ts = 0,16 + 0,02 NDVI | Ts = 0,1 + 0,02 NDVI | Al = 1,1 – 2,3 NDVI  | Al = 0,9 – 1,16 NDVI | Al = 0,6 – 0,6 NDVI |           |  |  |
| Болога                         | Al = 16,1 + 27,0 Ts |                     |                     | Ts = 0,1 + 0,03 NDVI |                       |                      | Al = 0,3 + 2,6 NDVI  |                      |                     |           |  |  |
| Лесотундровая                  | Al = 13,8 + 52,1 Ts | Al = 11,5 + 64,7 Ts | Al = 10,0 + 77,8 Ts | Ts = 0,5 + 0,01 NDVI | Ts = 1,2 – 0,02 NDVI  | Ts = 1,0 – 0,01 NDVI | Al = 0,5 + 1,6 NDVI  | Al = 1,0 – 1,6 NDVI  | Al = 1,0 – 1,9 NDVI |           |  |  |
| Северотаежная                  | Al = 19,5 + 12,4 Ts | Al = 20,1 + 8,5 Ts  | Al = 20,2 + 16,7 Ts | Ts = 1,4 – 0,0 NDVI  | Ts = 1,3 – 0,02 NDVI  | Ts = 1,2 – 0,02 NDVI | Ts = 1,0 – 0,01 NDVI | Al = 0,8 + 0,1 NDVI  | Al = 0,7 + 0,2 NDVI |           |  |  |
| Среднетаежная                  | Al = 19,2 + 14,2 Ts | Al = 15,6 + 43,2 Ts | Al = 15,7 + 42,9 Ts | Ts = 1,3 – 0,02 NDVI | Ts = 1,5 – 0,03 NDVI  | Ts = 1,0 – 0,00 NDVI | Al = 0,7 + 0,5 NDVI  | Al = 1,0 – 1,4 NDVI  | Al = 0,5 + 1,8 NDVI |           |  |  |
| Южнотаежная                    | Al = 18,5 + 22,6 Ts | Al = 15,6 + 44,9 Ts | Al = 20,9 + 10,2 Ts | Ts = 1,2 – 0,02 NDVI | Ts = 1,7 – 0,04 NDVI  | Ts = 1,6 – 0,04 NDVI | Al = 0,9 – 0,3 NDVI  | Al = 1,1 – 2,3 NDVI  | Al = 0,8 – 0,1 NDVI |           |  |  |
| Подтаежная                     | Al = 20,2 + 24,7 Ts | Al = 1,2 + 137,2 Ts | Al = 9,4 + 75,2 Ts  | Ts = 1,6 – 0,03 NDVI | Ts = 1,2 – 0,02 NDVI  | Ts = 1,4 – 0,02 NDVI | Al = 1,0 – 1,4 NDVI  | Al = 1,3 – 3,2 NDVI  | Al = 0,9 – 0,5 NDVI |           |  |  |
| Широколиственно-лесная         | Al = 20,7 + 30,1 Ts |                     |                     | Ts = 1,6 – 0,03 NDVI |                       |                      | Al = 1,1 – 2,3 NDVI  |                      |                     |           |  |  |
| Лесостепная                    | Al = 36,1 – 48,6 Ts | Al = 22,3 + 41,7 Ts | Al = 23,5 + 0,1 Ts  | Ts = 1,5 – 0,00 NDVI | Ts = 1,5 – 0,03 NDVI  | Ts = 1,5 – 0,00 NDVI | Al = 0,6 + 0,6 NDVI  | Al = 0,8 – 0,9 NDVI  | Al = 0,4 + 2,3 NDVI |           |  |  |
| Степная типичная и сухостепная | Al = 6,3 + 152,2 Ts | Al = 7,8 + 153,7 Ts | Al = 5,4 + 143,9 Ts | Ts = 1,7 – 0,04 NDVI | Ts = 1,7 – 0,04 NDVI  | Ts = 1,7 – 0,03 NDVI | Al = 1,8 – 7,2 NDVI  | Al = 1,5 – 5,8 NDVI  | Al = 1,6 – 6,0 NDVI |           |  |  |
| Полупустынная и пустынная      | Al = 13 + 136,7 Ts  | Al = 32,1 + 41,6 Ts |                     | Ts = 1,2 – 0,02 NDVI | Ts = 1,7 – 0,03 NDVI  |                      | Al = 1,2 – 4,0 NDVI  | Al = 0,6 – 1,7 NDVI  |                     |           |  |  |

Примечание: цветом выделены связи между параметрами: коричневым — значимые положительные, розовым — незначимые положительные, синим — значимые отрицательные, голубым — незначимые отрицательные.

Значимая положительная корреляция альбедо с температурой поверхности прослеживается в лесотундре, тайге (за исключением части северотаёжной зоны), степи и полупустыне (см. табл. 2). В широколиственной лесной зоне и лесостепи альбедо почти не меняется, но температура поверхности резко растёт вдоль профиля примерно на  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что приводит к практически нулевой или слабо отрицательной связи альбедо и температуры поверхности и говорит о неустойчивости этой связи. Отрицательная корреляция в данной зоне на профиле  $45^{\circ}$  в.д. также может быть связана с большой антропогенной нагрузкой на ландшафты правобережья Волги.

Положительная корреляция альбедо и температуры поверхности в степи и полупустыне возможна вследствие доминирования эвапотранспирационного регулирования температуры поверхности (Золотокрылин, 2003, 2009; Золотокрылин, Титкова, 2011).

Изменения NDVI с севера на юг близки к неправильной параболе, а температура поверхности меняется нелинейно (см. рис. 2б, в). Это проявляется в характере связи температуры поверхности с NDVI (см. рис. 3б, табл. 2). Положительная значимая корреляция между температурой поверхности и NDVI, при которой оба параметра могут одновременно расти (уменьшаться), характерна для тундры материковой и тундры арх. Новая Земля. В зоне лесотундры могут наблюдаться устойчивые связи, как положительные, так и отрицательные, из-за присутствия лесных и травянистых сообществ. В основном в таёжных ландшафтах связь слабо отрицательная. Здесь NDVI достигает наибольших значений и изменяется от 0,7 до 0,9 при мало меняющейся температуре поверхности  $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В степных и полупустынных ландшафтах с ростом температуры поверхности до  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  NDVI падает практически линейно (значимая отрицательная связь).

Представленный на рис. 3в график корреляции альбедо и NDVI внешне отличается от рассмотренной выше связи температуры поверхности и NDVI (см. рис. 3б). Корреляция во многих лесных зонах статистически слабая. Но при детальном сравнении видно сходство знака связи в каждой ландшафтной зоне. В тундре, лесотундре и таёжной зоне связь в целом отрицательна. Отмечающаяся смена знака в лесотундре на профиле  $45^{\circ}$  в.д. и в северной тайге Западной Сибири связана с большой заболоченностью этой местности. В лесостепи корреляция слабая и может быть как положительной, так и отрицательной. Южнее, в степи и полупустыне, корреляция становится устойчиво отрицательной.

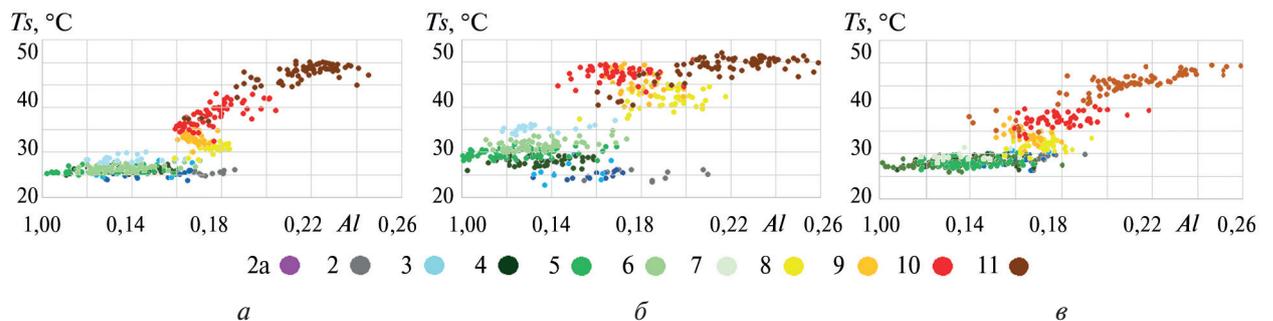


Рис. 4. Связь спектральных характеристик в ландшафтных зонах альбедо ( $Al$ ) с температурой поверхности ( $T_s$ ) на профиле  $45^{\circ}$  в.д., июль:  $a$  — 2000–2019 гг.;  $b$  — 2010 г.;  $v$  — 2016 г. Ландшафтные зоны см. на рис. 1

Отдельно рассмотрим механизмы регулирования температуры поверхности в аномальные годы для профиля  $45^{\circ}$  в.д. В районе этого профиля в июле 2010 г. наблюдались крайне засушливые условия от севера до юга (Булыгина и др., 2011). Как видно на рис. 4б, засуха 2010 г. повысила температуру поверхности во всех зонах, что повлияло на характер связи альбедо и температуры поверхности (табл. 3). Максимальное повышение  $T_s$  на  $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечалось в лесостепи, типичных и сухих степях по сравнению со средними условиями. В тундре произошла смена эвапотранспирационного регулирования  $T_s$  радиационным, понижающим температуру поверхности при росте альбедо. От болот лесотундры до северной тайги связь  $Al$  и  $T_s$

ослабла. В засуху радиационное регулирование поверхности усилилось и продолжало доминировать в лесостепи. В степях положительная связь  $Al$  и  $Ts$  значительно ослабла. В тёплое и влажное лето 2016 г. (Булыгина и др., 2016) связь  $Al$  и  $Ts$  ослабевает только в северной и южной тайге (см. табл. 3).

Таким образом, в аномально сухие, жаркие и влажные годы полученные связи  $Al$  и  $Ts$  ослабевают, что может говорить о чувствительности ландшафтов к колебаниям климата.

Таблица 3. Линейный регрессионный анализ связи альbedo и температуры поверхности зональных ландшафтов по меридиану 45° в.д. для аномальных лет (июль 2010 г. — засуха, июль 2016 г. — тёплое и влажное лето)

| Ландшафтная зона               | 2010 г.               | 2016 г.               |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Тундровая                      | $Al = 22,5 - 16,3 Ts$ | $Al = 11,3 + 72,5 Ts$ |
| Болота                         | $Al = 15,7 + 27 Ts$   | $Al = 20,1 + 21,4 Ts$ |
| Лесотундровая                  | $Al = 16,5 + 31,6 Ts$ | $Al = 14,9 + 61,1 Ts$ |
| Северотаёжная                  | $Al = 21,2 + 12,4 Ts$ | $Al = 21,9 + 10,3 Ts$ |
| Среднетаёжная                  | $Al = 22,5 + 19,4 Ts$ | $Al = 20,1 + 20,6 Ts$ |
| Южнотаёжная                    | $Al = 21,8 + 35 Ts$   | $Al = 21 + 14,1 Ts$   |
| Подтаёжная                     | $Al = 26,3 + 29,5 Ts$ | $Al = 18,5 + 43,4 Ts$ |
| Широколиственно-лесная         | $Al = 32,1 + 28,7 Ts$ | $Al = 20,0 + 40,6 Ts$ |
| Лесостепная                    | $Al = 61,8 - 1,17 Ts$ | $Al = 40,4 - 69 Ts$   |
| Степная типичная и сухостепная | $Al = 42,1 + 1,3 Ts$  | $Al = 22,4 + 57,3 Ts$ |
| Полупустынная и пустынная      | $Al = 27,8 + 74,8 Ts$ | $Al = 16,7 + 111 Ts$  |

Обозначения см. в табл. 2.

## Выводы

1. Существует определённый диапазон спектральных характеристик, соответствующих каждой ландшафтной зоне. По отдельным спектральным характеристикам ландшафты соседних зон могут отличаться незначительно, но по их совокупности каждая ландшафтная зона индивидуальна.
2. Каждый ландшафт может быть охарактеризован теснотой связи спектральных характеристик (вегетационного индекса, альbedo и температуры поверхности).
3. Корреляция альbedo и температуры поверхности в большинстве ландшафтных зон устойчиво положительна (доминирование эвапотранспирационного механизма регулирования температуры поверхности), за исключением тундровых ландшафтов южной части арх. Новая Земля и о. Вайгач, где она отрицательна (доминирование радиационного регулирования температуры поверхности). Положительная связь температуры поверхности с индексом NDVI наблюдается в тундре и отчасти в лесотундре. Во всех остальных ландшафтах она отрицательна и усиливается при продвижении к полупустынным ландшафтам.
4. Формирование положительной связи  $Ts$ –NDVI в тундре и местами лесотундре свидетельствует о возрастающей роли растительного компонента ландшафтов при потеплении.
5. В экстремальные в климатическом отношении годы выявленные связи  $Al$  и  $Ts$  северных (от тундры до северной тайги) и южных (от широколиственных лесов до степных типичных) ландшафтов ослабевают, что может говорить о чувствительности ландшафтов к колебаниям климата. В тундре более сухие условия могут быть ответственны за возможную смену эвапотранспирационного регулирования температуры поверхности радиационным.

Исследование выполнено в Институте географии Российской академии наук за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-10236-П).

## Литература

1. Бульгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н. Погода на территории Российской Федерации в 2010 году. ВНИИГМИ МЦД, 2011. URL: <http://meteo.ru/component/content/article/93-klimaticheskie-usloviya/188-pogoda-na-territorii-rossijskoj-federatsii-v-2010-godu>.
2. Бульгина О. Н., Коршунова Н. Н., Клещенко Л. К., Аржанова Н. М., Деметьева Т. М. Погода на территории Российской Федерации в 2016 году. ВНИИГМИ МЦД, 2016. URL: <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/93-klimaticheskie-usloviya/697-pogoda-na-territorii-rossijskoj-federatsii-v-2016-godu>.
3. Дьяконов К. Н., Варлыгин Д. Л., Ретеюм А. Ю. Влияние океанов на физико-географическую зональность по спутниковым данным о фотосинтезе // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 2. С. 11–15.
4. Золотокрылин А. Н. Климатическое опустынивание / ред. Кренке А. Н. М.: Наука, 2003. 246 с.
5. Золотокрылин А. Н. Факторы регулирования температуры засушливых земель по данным AVHRR NOAA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. № 6. С. 380–387.
6. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 14–22.
7. Куулар Х. Б. Температура ландшафтной поверхности Республики Тыва по данным спутника Landsat-8 в зимний период 2014–2017 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 67–77. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-67-77.
8. Национальный атлас России. В 4-х т. Т. 2. Природа. Экология. М.: ПКО «Картография», 2007. 496 с.
9. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 209 с.
10. Саидов А. Г. Структура реляционной БД КСЯ основных типов ландшафта и ее программное обеспечение на базе ГИС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 70–74.
11. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
12. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310.

## The spectral portrait of plain landscapes in Russia

**T. B. Titkova, A. N. Zolotokrylin, V. V. Vinogradova**

*Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*

*E-mails: titkova@igras.ru, zolotokrylin@igras.ru, vvinog@yandex.ru*

A comprehensive study of the spectral characteristics of the main types of plain landscapes of Russia was carried out. A pattern of changes in the surface spectral characteristics is shown according to the latitude for different landscape zones using MODIS data. The quantitative characteristics of albedo, surface temperature and NDVI are given for plain landscapes in the European part of Russia and in Western Siberia. The connections between the surface spectral characteristics and the types of zonal plain landscapes are explored. Concerning individual spectral parameters, the landscapes of the adjacent zones may be similar. In terms of the whole complex of parameters, this zone landscapes are quantitatively characterized by a certain combination of spectral properties and connections between them. The correlation of albedo and surface temperature in different landscapes can be either positive or negative. Surface temperature positively correlates with albedo in the mainland tundra at profiles 45 and 55° E, but significantly negative in the tundra of Novaya Zemlya, Vaigach Island and the mainland tundra on the profile of 70° E, where vegetation is found on rocky surfaces. Here, the negative

correlation is explained by the dominance of the radiation (albedo) mechanism for controlling surface temperature with respect to evapotranspiration. The interzonal differences in the spectral properties of landscapes are shown, and the tightness of the connections of the spectral components in each landscape zone is estimated. Surface temperature in general is positively connected with albedo, with the exception of tundra landscapes in the southern parts of Novaya Zemlya. In the majority of landscapes, except for northern ones, the connection between NDVI and surface temperature is negative, and it increases towards semidesert landscapes. Albedo and NDVI have weak linkages in many landscapes. In tundra, forest tundra and taiga the connection in general is slightly negative, and it is significant only in steppe and semidesert. The formation of a positive  $T_s$ –NDVI bond in the tundra and in places in the forest-tundra indicates the growing role of the plant component of landscapes during warming.

**Keywords:** MODIS, albedo, surface temperatures, NDVI, plain landscapes

Accepted: 17.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126

## References

1. Bulygina O. N., Korshunova N. N., Razuvaev V. N., *Pogoda na territorii Rossiiskoi Federatsii v 2010 godu* (Weather in the Russian Federation in 2010), RIHMI-WDC, available at: <http://meteo.ru/component/content/article/93-klimaticheskie-usloviya/188-pogoda-na-territorii-rossijskoj-federatsii-v-2010-godu>.
2. Bulygina O. N., Korshunova N. N., Kleshchenko L. K., Arzhanova N. M., Dement'eva T. M., *Pogoda na territorii Rossiiskoi Federatsii v 2016 godu* (Weather in the Russian Federation in 2016), RIHMI-WDC, available at: <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/93-klimaticheskie-usloviya/697-pogoda-na-territorii-rossijskoj-federatsii-v-2016-godu>.
3. D'yakonov K. N., Varlygin D. L., Retezum A. Yu., Vliyanie okeanov na fiziko-geograficheskuyu zonal'nost' po sputnikovym dannym o fotosinteze (The influence of the oceans on the physical-geographical zoning according to satellite data on photosynthesis), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5, Geografiya*, 2017, No. 2, pp. 11–15.
4. Zolotokrylin A. N., *Klimaticheskoe opustynivanie* (Climate desertification), Krenke A. N. (ed.), Moscow: Nauka, 2003, 246 p.
5. Zolotokrylin A. N., Faktory regulirovaniya temperatury zasushlivykh zemel' po dannym AVHRR NOAA (Dryland Temperature Control Factors According to AVHRR NOAA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 2, No. 6, pp. 380–387.
6. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Novyi podkhod k monitoringu ochagov opustynivaniya (A new approach to the monitoring of desertification centers), *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 17, No. 3(48), pp. 14–22.
7. Kuular Kh. B., Temperatura landshaftnoi poverkhnosti Respubliki Tyva po dannym sputnika Landsat-8 v zimnii period 2014–2017 gg. (The temperature of the landscape surface of the Republic of Tyva according to the Landsat-8 satellite in the winter of 2014–2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 67–77, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-67-77.
8. *Natsional'nyi atlas Rossii, V 4 t., T. 2, Priroda. Ekologiya* (National Atlas of Russia, Vol. 2: Nature. Ecology), Moscow: PKO "Kartografiya", 2007, 496 p.
9. Panovskii G. A., Braier G. V., *Statisticheskie metody v meteorologii* (Statistical Methods in Meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 209 p.
10. Saidov A. G., Struktura relyatsionnoi BD KSYa osnovnykh tipov landshafta i ee programmnoe obespechenie na baze GIS (The structure of the relational database of the QWS of the main types of landscape and its software based on GIS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 70–74.
11. Titkova T. B., Vinogradova V. V., Otklik rastitel'nosti na izmenenie klimaticheskikh uslovii v boreal'nykh i subarkticheskikh landshaftakh v nachale XXI veka (The response of vegetation to changes in climatic conditions in boreal and subarctic landscapes at the beginning of the XXI century), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 75–86.
12. Titkova T. B., Vinogradova V. V., Izmeneniya klimata v perekhodnykh prirodnykh zonakh severa Rossii i ikh proyavlenie v spektral'nykh kharakteristikakh landshaftov (Climate changes in the transitional natural zones of the north of Russia and their manifestation in the spectral characteristics of landscapes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 310–323, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310.