

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУНДРОВЫХ И ЛЕСОТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ В ГОДЫ ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ

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

Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29;
*адрес для переписки: *titkova@igras.ru*

Реферат. Сохраняющееся в последние годы потепление в высоких широтах оказывает непосредственное воздействие на арктические и субарктические ландшафты. Возможные изменения этих ландшафтов при потеплении климата тесно связаны с механизмами регулирования температуры подстилающей поверхности. В работе исследовались особенности формирования радиационного и эвапотранспирационного механизмов регулирования температуры поверхности в тундровых (от арктических до южных) и лесотундровых ландшафтах Новой Земли и Западной Сибири. Были использованы спектральные характеристики поверхности по MODIS данным: альбедо (Al) и температура поверхности (T_s) за июль 2000-2019 гг.

Показано, что радиационный механизм регулирования температуры поверхности доминирует в ледниковых и полярно-пустынных ландшафтах Арктики и Субарктики с преобладанием каменистых и щебнистых типов поверхности с лишайниками. При этом в горной и арктической тундре Новой Земли радиационный механизм регулирования температуры поверхности практически не зависит от погодных аномалий и на данный момент слабо зависит от тренда приповерхностной температуры воздуха.

В материковой тундре и лесотундре начинает преобладать эвапотранспирационный тип регулирования температуры поверхности. Этому способствуют повышение среднемесячных температур воздуха до $15\text{--}16^\circ\text{C}$, что благоприятно сказывается на разнообразии растительности. В подзоне южной тундры и лесотундре связь альбедо и температуры поверхности зависит от высоты местности, экспозиции склонов и особенно – от экстремальных температурных аномалий. В низинах (гидроморфных комплексах) в холодные годы на фоне переувлажнения преобладает радиационный тип регулирования температуры поверхности, а в теплые годы уменьшение влажности ведет к максимальному развитию растительности, и механизм связи может переходить в эвапотранспирационный. На возвышенностях наблюдается обратный процесс, что также связано с изменениями условий увлажнения. В лесотундре при повышении температуры воздуха и увеличении высоты растительного покрова эвапотранспирационный механизм связи спектральных параметров $Al\text{--}T_s$ ослабевает. Таким образом, в южных тундрах и лесотундре возможно существование двух устойчивых положений равновесия связи спектральных свойств поверхности в зависимости от освещенности и температурных аномалий.

Ключевые слова. Арктика, тундра, лесотундра, температура поверхности, альbedo, спектральные характеристики ландшафта.

Введение

Сохраняющееся в последние годы потепление в высоких широтах оказывает непосредственное воздействие на арктические и субарктические ландшафты. (Jia et al., 2003). Прогнозируемое сокращение тундры (Loarie et al., 2009) приведет к снижению отражательной способности поверхности, усиливая глобальное потепление, поскольку застраивающие кустарником и лесом районы имеют более плотную структуру и, таким образом, будут поглощать больше солнечного тепла, чем типичная тундра. Авторы (Blok et al., 2011) говорят, что увеличение растительного покрова лиственных кустарников в Арктике в ответ на повышение температуры воздуха может привести к снижению летнего альбедо поверхности и вызвать нагревание атмосферы, тем самым потенциально вызывая петлю положительной обратной связи, ведущую к дальнейшему увеличению роста кустарников, т.е. обусловленное температурой увеличение зеленой биомассы может привести к снижению летнего альбедо.

Возможные изменения арктических и субарктических ландшафтов при потеплении климата тесно связаны с механизмами регулирования температуры подстилающей поверхности. Анализ накопленных данных о спектральных характеристиках поверхности в преимущественно аридных природных зонах свидетельствует о конкуренции трех механизмов регулирования температуры подстилающей поверхности: радиационного (альбедного), эвапотранспирационного и аэродинамического (Becker et al., 1988; Золотокрылин, 2003). Каждому механизму соответствует положительная или отрицательная связь (корреляция) между альбедо и температурой поверхности (Золотокрылин, Титкова, 2012). Радиационный механизм характерен для аридных ландшафтов со слабо развитым или отсутствием растительного покрова. Поверхность аридных ландшафтов преимущественно песчаная (альбедо 25%) или щебнисто-каменистая (альбедо 21%). Аридные ландшафты получают малое количество осадков, что вызывает недостаток влаги в поверхностном слое песчаного или щебнисто-каменистого субстрата. Радиационное регулирование температуры поверхности в аридных ландшафтах – это, когда при возрастании альбедо поверхности происходит уменьшение поглощения радиационной энергии ее деятельным слоем. При этом температура поверхности снижается и, наоборот. При доминировании этого механизма в аридных ландшафтах наблюдается отрицательная корреляция альбедо и температуры поверхности. Весь радиационный баланс пустыни расходуется на нагревание воздуха и почвы. Большая часть поступающего дневного тепла переносится потоком явного тепла в атмосферу. За сутки поток явного тепла составляет почти 90% от радиационного баланса, а отношение Боуэна достигает 10 (Золотокрылин, 2003). Сравним структуру теплового баланса в пустыне аридных ландшафтов с тепловым балансом субарктической пустыни (окрестности

Тикси), полученную путем прямых измерений. Поверхность арктической измерительной площадки состоит из щебнистого и каменистого субстратов, покрытых лишайниками. Сплошной почвенный покров отсутствует, альbedo равно 0.18 (Тепловодообмен ..., 2007, с.20). Градиентные и пульсационные наблюдения проводились летом 1998 г (Kodama et al., 2000), иградиентные в июле 1997 г. (Казанский, Золотокрылин, 2004). Отношение Боэна в полуденные часы достигало 3.5, т.е. поток явного тепла значительно превышал поток скрытого, как и в случае пустынь аридных ландшафтов. Это дает нам возможность, в какой-то мере, изучать распространения радиационного и эвапотранспирационного механизмов регулирования температуры поверхности в арктической и субарктической пустыне по аналогии с аридными ландшафтами.

Анализ корреляции альbedo и температуры поверхности (спутниковые данные) вдоль заданных равнинных долготных профилей на Европейской и Азиатской части страны, пересекающих все типы зональных ландшафтов, свидетельствует об устойчивой смене знака корреляции с отрицательного в аридных ландшафтах на положительный в степных, лесостепных и лесных (Титкова и др., 2020). Во всех этих ландшафтах затраты тепла на эвапотранспирацию составляют основную часть теплового баланса, а отношение Боэна становится меньше единицы. Преобладание затраты тепла на эвапотранспирацию в структуре теплового баланса типично в ландшафтах с достаточным увлажнением и высоким вегетационным индексом. Эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности становится при этом доминирующим по отношению к радиационному. Эвапотранспирационное регулирование проявляется, когда при увеличении альbedo поверхности, эвапотранспирация уменьшается, что ведет к повышению температуры поверхности (положительная связь альbedo и температуры поверхности). Это часто происходит в засуху в результате недостатка влаги и угнетения растительного покрова. Эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности тесно связано с аэродинамическим регулированием через параметр шероховатости (Becker et al., 1988). Аэродинамический механизм: если плотность низкорослого 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 при неизменном альbedo (в данной работе этот механизм не рассматривается).

В суббореальных (степных, лесостепных), boreальных (лесных) ландшафтах эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности является доминирующим фактором (Титкова и др., 2020). В этих растительных зонах заметная часть поглощенного поверхностью радиационного тепла тратится на транспирацию и испарение. В итоге, в случае увеличения альbedo поверхности, что часто бывает в засуху, температура поверхности возрастает (между ними возникает положительная корреляция), так как часть тепла, тратившегося на транспирацию, переключается на турбулентный прогрев приземного слоя атмосферы. С повышением температуры воздуха происходит увеличение температуры поверхности.

В связи с этим, особое внимание уделяется исследованиям связи альбедо и температуры поверхности в субарктических ландшафтах (лесотундре, тундре) (Титкова, Виноградова, 2015; 2019). Но в этих работах недостаточное внимание уделялось ландшафтам арктических островов. Данная работа восполняет этот пробел и направлена на комплексное исследование спектральных характеристик поверхности (альбедо, температура) и их связи в тундровых и лесотундровых ландшафтах Западной Сибири (Ямало-Ненецкий автономный округ) и арктических ландшафтов Новой Земли в июле за период 2000-2019 гг. Основная задача исследования – это изучение особенностей формирования радиационного и эвапотранспирационного механизмов регулирования температуры поверхности на основании оценки взаимосвязи их спектральных характеристик.

Новизна работы состоит в изучение распространения радиационного и эвапотранспирационного механизмов регулирования температуры поверхности в Арктической зоне в условиях современного потепления, а также в оценке изменений спектральных особенностей территории в аномальные в климатическом отношении годы. Полученные оценки распространения этих механизмов и их изменения могут быть полезными в качестве индикаторов эволюции ландшафтов севера.

Методы и материалы

Территория исследования – арктические тундры (в том числе горные) Новой Земли, подзона южной тундры, и лесотундры Западной Сибири. Исследования спектральных характеристик поверхности тундры и лесотундры велись в пределах выбранных квадратов (рис. 1) с подробным рассмотрением меридиональных профилей в зоне арктической и южной тундры и широтного профиля в зоне лесотундры. Выбор расположения профилей объясняется особенностями рельефа местности.

На Новой Земле территория исследования находится в пределах 71.5° - 72.5° с.ш. 53.8° - 55.2° в.д., в западной части которой находятся ландшафты горной тундры, а в восточной, более пологой – арктической тундры. В подзоне высокоарктических тундр (полярных пустынь), в основном встречаются травяно-лишайниково-моховые пятнистые, моховые, лишайниковые тундры. Горная тундра рассмотрена на примере профиля вдоль 54.2° в.д. в самом центре Южного острова Новой Земли. Высота местности от 200 до 550 м, которая на всем протяжении представлена в основном южным склоном (рис. 2а). Профиль в материковой тундре проходит вдоль 55° в.д. не далеко от побережья Карского моря. Высота местности в основном от 100 до 300 м. с небольшим южным уклоном (рис. 2б).

Ледниковые арктические ландшафты отличаются более высоким альбедо (0.40) по сравнению с арктическими полярно-пустынными (0.20). Хотя излучательная способность льда и снега велика, абсолютное значение длинноволнового излучения подстилающей поверхности остается относительным малым из-за низких температур. В случае таяния льда и снега температура

поверхности становится равной 0°C , а величина длинноволнового излучения поверхности остается постоянной величиной (Оке, 1982).

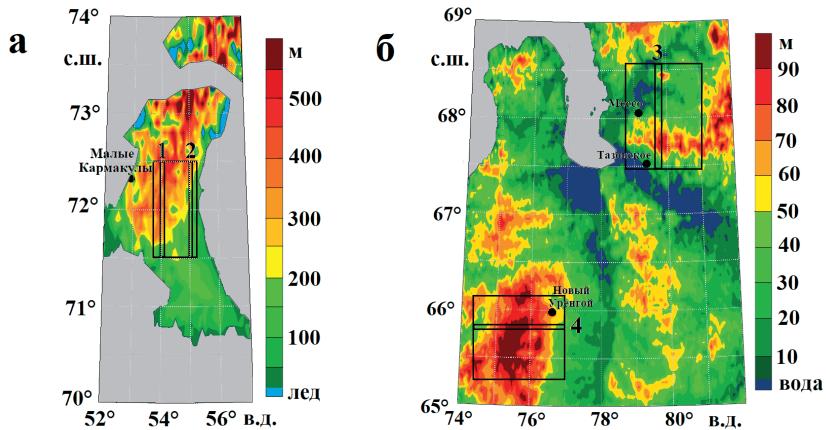


Рисунок 1. Рельеф местности с обозначенными квадратами и профилями исследования:
а) район Новой Земли с профилями в горной тундре (1) и арктической тундре (2), б) часть Гыданского п-ова в районе Обской губы – квадрат в материковой тундре (3) и квадрат в лесотундре (4)

Figure 1. Terrain relief with marked squares and study profiles:

- а) Novaya Zemlya area with profiles in mountain tundra (1) and arctic tundra (2), б) part of the Gydan Peninsula in the region of the Ob Bay губы – a square in the mainland tundra (3) and a square in the forest-tundra (4)

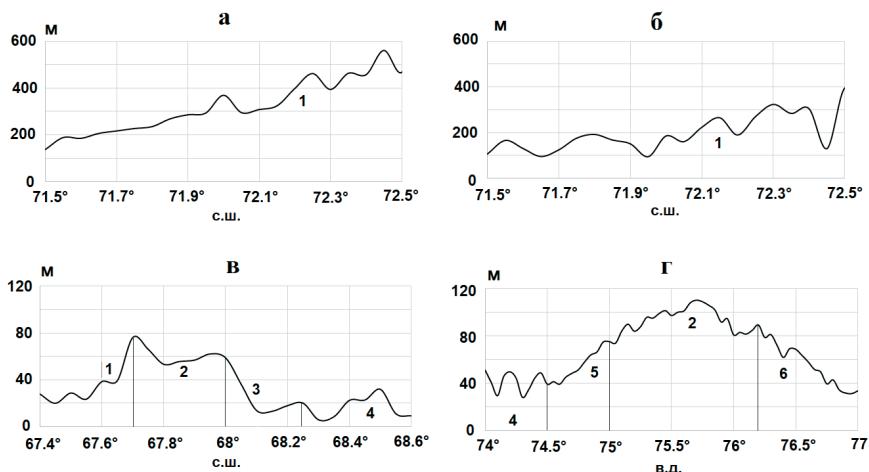


Рисунок 2. Рельеф исследуемых профилей:
а) горная тундра, б) арктическая тундра, в) материковая южная тундра, г) лесотундра
1 – южный склон, 2 – возвышенность, 3 – северный склон, 4 – гидроморфный комплекс,
5 – западный склон, 6 – восточный склон

Figure 2. The relief of the studied profiles:

- а) mountain tundra, б) arctic tundra, в) southern continental tundra, г) forest tundra
1 – southern slope, 2 – upland, 3 – northern slope, 4 – hydromorphic complex, 5 – western slope,
6 – eastern slope

Квадрат в материковой южной тундре находится в пределах $67.4^{\circ}\text{--}68.6^{\circ}$ с.ш. $78.3^{\circ}\text{--}80.5^{\circ}$ в.д. Здесь профиль проходит с севера на юг ($67.4^{\circ}\text{--}68.6^{\circ}$ с.ш.)

более 100 км вдоль меридиана 79.6° в.д. в междуречье нижнего течения рек Таз и Мессояха. Высота местности меняется на профиле от нескольких метров до 70-80 м. До 67.65° с.ш. склоны имеют преимущественно южную экспозицию. Севернее и до 68° с.ш., преобладают участки высотой 60-80 м. На широтах 68° - 68.25° с.ш. значительную часть рельефа представляют северные склоны, а на широте 68.3° - 68.6° с.ш. рельеф представлен гидроморфными комплексами (рис. 2в) (Национальный атлас, 2004-2008). К гидроморфным комплексам тунды и лесотунды относятся ландшафты, формирующиеся в условиях избыточного увлажнения, которое является результатом поверхностного застоя атмосферных осадков в отсутствие их оттока в подстилающую толщу или по склону. В подзоне южных кустарниковых и кочкарных тундр на юго-западе Гыданского п-ова зональная растительность на вершинах водораздельных увалов представлена вариантами ерниково- и ерниково-кустарничковых тундр (Огуреева и др. 1999). На Тазовском п-ове склоны долин покрыты густыми ольховниками, а днища лощин и вогнутые склоны – ивняками и сырьими луговинами (Хитун, 2005).

В лесотундре район исследования расположен в пределах 65.3° - 66.2° с.ш. 74.2° - 77° в.д. с профилем вдоль 65.8° с.ш. вытянутым с запада на восток. Гидроморфный комплекс простирается до 74.5° в.д., и затем переходит в западный склон до 75° в.д. Возвышенность 90-110 м протягивается до 76.3° в.д. и переходит в восточный склон (рис. 2г). Здесь растительность представлена предтундровыми редколесьями в сочетании с южными гипоарктическими тундрами, а также лиственничными, елово-лиственничными кустарниками кустарниковыми кустарничково-лишайниково-зеленомошными редколесьями, бугристыми кустарничково-мохово-лишайниковые болотами (Огуреева и др. 1999).

Изменения температуры в июле оценивались по метеостанциям Малые Кармакулы (52.7° в.д., 72.37° с.ш.), расположенной на западном побережье Новой Земли и Тазовская (67.46° с.ш.; 78.73° в.д.) находящейся в низовьях р. Таз (www.meteo.ru). Исследуемые территории и профили находятся в непосредственной близости от этих метеостанций.

Для анализа использовались спектральные характеристики поверхности по спутниковым данным MODIS: альbedo (Al) и температура (Ts). Альбето поверхности – данные модели MCD43C1, версия 6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c1v006/>). Функция двунаправленного распределения отражения и набор параметров модели Albedo (BRDF / Albedo) производится ежедневно с использованием 16-дневных данных Terra и Aqua MODIS в CMG с разрешением $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$. В работе использовалось интегрированное изотропное альбето наблюдаемое в дневное время в видимом диапазоне для середины месяца с 7 по 25 июля. На территории Новой Земли пиксели с высоким значением альбето, которые идентифицировались как снежники, были исключены из обрабатываемого массива данных.

Температура поверхности – модель MOD11C3 версии 6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/>), обеспечивает ежедневные значения Земли и коэффициента излучения (LST & E) с разрешением $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$. Значения LST & E в продукте MOD11C3 получены путем усреднения значений

из соответствующего месяца ежедневных файлов MOD11C1. Использовалась температура поверхности наблюдаемая в дневное время.

На каждый квадрат исследования приходится от 600 точек (Новая Земля при перепаде высоты до 400м) до 1100 тчк (Лесотундра при перепаде 60 м). Рельеф наших участков изменяется достаточно однородно, без резких перепадов. Такое разрешение помогает увидеть общие закономерности, убирая лишнюю мозаичность подстилающей поверхности.

Рассчитывалась корреляция Al и Ts для участков с разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Таким образом, каждый коэффициент корреляции оценивался по 25 точкам (5×5). Анализировались средние месячные коэффициенты корреляции для каждого года и в целом для периода 2000-2019 гг. Поля корреляции строились в системе MATLAB. Значимость парной корреляции оценивалось по критерию Стьюдента с вероятностью 0.95.

Результаты

Связь спектральных параметров в тундре и лесотундре

Рассматривая связь Al-Ts можно отметить, что она значимо отрицательна, как в горной, так и арктической тундре (рис. 3а, б). При этом в горной тундре разброс альбедо незначительно больше при меньших Ts. В южных тундрах температура поверхности увеличивается, а альбено понижается, и зависимость Al-Ts меняет свой знак и становится значимо положительной (рис. 3в). В лесотундре связь между спектральными параметрами становится слабее (рис. 3г) из-за большего разброса температуры поверхности и уменьшения альбено. Этому способствует увеличение покрытия поверхности растительностью. Таким образом, с продвижением с севера от арктических тундр на юг до лесотундры корреляционная связь Al-Ts значимо меняется с отрицательной на положительную.

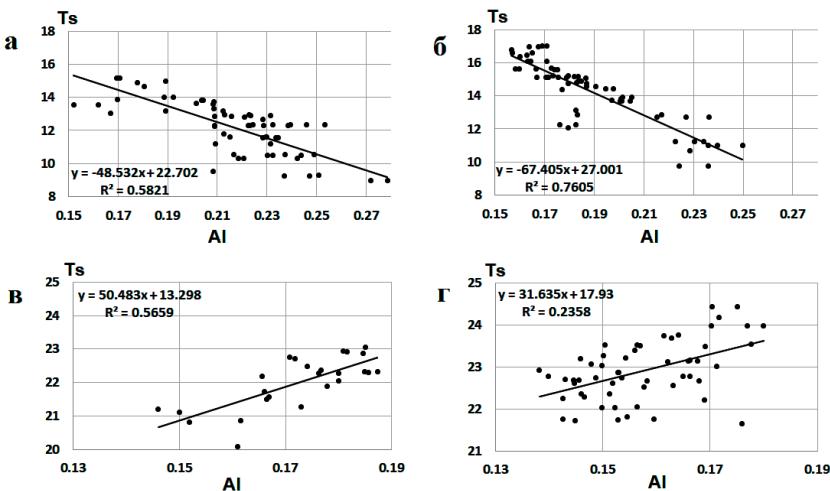


Рисунок 3. Связь Al-Ts в среднем за июль 2000-2019 гг. на профилях:

а) горная тундра, б) арктическая тундра, в) материковая южная тундра, г) лесотундра

Figure 3. Al-Ts relationship on average for July 2000-2019 on the profiles:

a) mountain tundra, b) arctic tundra, c) continental southern tundra, d) forest tundra

Зависимость связи Al-Ts от температуры

На рассматриваемой территории, при условии постоянного переувлажнения, флуктуации июльской температуры могут влиять на развитие растительности и, следовательно, возможного изменения механизмов регулирования температуры поверхности.

Межгодовой ход среднесуточной июльской температуры воздуха за период 2000-2018 гг. на ст. Малые Кармакулы (Западное побережье Новой Земли) и Тазовское показан на рис. 4. Положительные тренды температуры на обеих станциях сопровождаются отрицательными трендами корреляции Al-Ts разной степени интенсивности и значимости во всех рассматриваемых ландшафтных зонах. В горной тундре тренд Al-Ts самый слабый, практически нулевой. Но межгодовой ход изменений температуры воздуха и связи Al-Ts в горной и арктической тундре довольно близки. В теплые годы отрицательная связь Al-Ts ослабевает, а иногда становится слабоположительной, что может говорить о возможности изменения механизма регулирования температуры поверхности при дальнейшем росте температуры в Арктике. При продвижении на юг увеличивается отрицательный тренд связи Al-Ts, а положительный тренд температуры воздуха уменьшается.

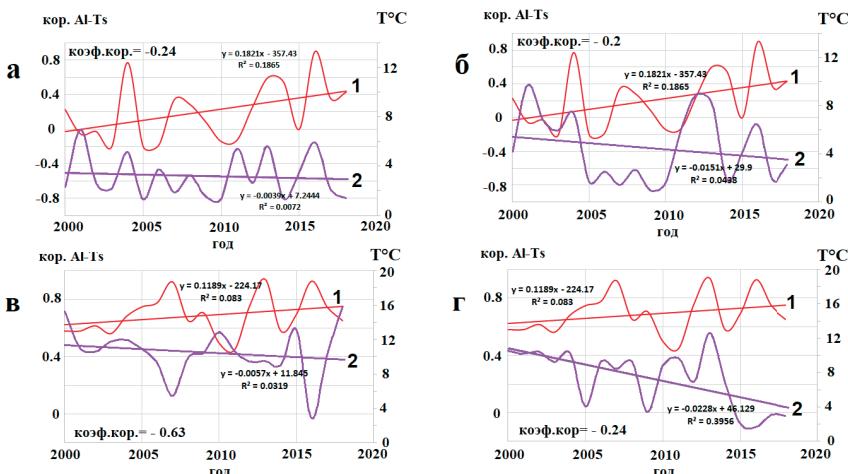


Рисунок 4. Изменение температуры и корреляции Al-Ts по ландшафтным зонам, июль:
а) горные тундры, б) арктические тундры, в) южные материковые тундры, г) лесотундра.

1 – Температура, 2 – Корреляция Al-Ts

Figure 4. Changes in temperature and correlation Al-Ts by landscape zones, July:
a) mountain tundra, b) arctic tundra, c) southern continental tundra, d) forest tundra.
1 – Temperature, 2 – Al-Ts correlation

Годы с температурными аномалиями

Для детального исследования зависимости регулирования температуры поверхности от температурных аномалий были выбраны годы с экстремально теплыми и экстремально холодными температурами в июле (значения, выходящие за пределы стандартного отклонения). На обеих станциях (Малые Кармакулы и Тазовское) положительные аномалии июльской температуры отмечались в 2013 и 2016 гг., а отрицательные – в 2011 г.

В горных и арктических тундрах на максимально прогреваемом южном склоне при отрицательных температурных аномалиях связь Al–Ts значимо отрицательна (табл. 1). При положительных аномалиях температуры связь ослабевает, но ее знак сохраняется.

В гидроморфных комплексах материковой южной тундры значимая отрицательная связь Al–Ts в холодные годы меняет знак и становится значимо положительной в теплые годы, причем с более высоким коэффициентом детерминации. Повышение температуры и, в данном случае, уменьшение увлажнения, способствует формированию положительной связи. На северном склоне в годы температурных аномалий связь сохраняется положительной и усиливается, несмотря на увеличение дифференциации температуры поверхности. На возвышенности при отрицательных аномалиях температуры диапазон изменений альбедо и температуры поверхности уменьшается, при этом связь остается положительной, а при положительных аномалиях – диапазон значений расширяется, а связь становится отрицательной.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Al–Ts в годы с температурными аномалиями в июле

ландшафтная зона / форма рельефа	2011	2016
горные тундры		
южный склон	-0.8	-0.15
арктические тундры		
южный склон	-0.76	-0.1
материковая тундра		
гидроморфный комплекс	-0.52	0.74
северный склон	0.41	0.56
возвышенность	0.14	-0.37
южный склон	-0.10	-0.12
лесотундра		
гидроморфный комплекс	-0.24	-0.10
западный склон	0.49	-0.02
возвышенность	0.54	-0.55
восточный склон	-0.15	0.74

Примечание: Значимые значения коэффициента корреляции по критерию Стьюдента с вероятностью 0.95 выделены полужирным.

Зависимость Al–Ts в гидроморфном комплексе лесотундровых ландшафтов выражена в меньшей степени, чем в южных тундрах (см. табл. 1). Корреляция Al–Ts слабо отрицательна как при отрицательных, так и при положительных аномалиях температуры. На получающем большее количество тепла западном склоне значимая положительная связь при холодной погоде ослабевает, а при теплой погоде приближается к нулю. На возвышенности в лесотундре корреляция Al–Ts ведет себя так же, как и в южной тундре – меняет знак при переходе от отрицательной аномалии температуры к положительной. Получающий меньшее количества тепла восточный склон харак-

теризуется слабо отрицательной связью Al-T_s при холодной аномалии и положительной при теплой аномалии. Таким образом, в северных ландшафтах механизм формирования связи Al-T_s зависит от высоты местности, экспозиции макросклонов и погодных условий, особенно от температурных аномалий. Это проявилось в изменении механизмов регулирования температуры поверхности в холодные (2011 г.) и теплые (2016 г.) годы.

Обсуждение

Обсуждение касается вопроса возможности использования метода связи альбедо – температура поверхности, оказавшегося полезным для аридных условий (дефицит осадков и влаги, избыточное тепло, практическое отсутствие растительности, преобладание песчаной и щебнисто-каменистых поверхностей), для субарктических ландшафтов (холодных, с избытком почвенной влаги, но малым количеством жидких осадков, заболоченных, с широким спектром тундровой растительности, наличием щебнисто-каменистых поверхностей в горных тундрах).

Если принять во внимание формулу для температуры поверхности, выведенную из уравнения теплового баланса земной поверхности (Будыко, 2020),

$$T_s = \frac{LE_0 + P + B}{R_0 + 4al\sigma T_b^3} + T_b$$

где T_s – температура поверхности, L – скрытая теплота испарения, E_0 – испаряемость, P – турбулентный поток тепла, B – поток тепла между поверхностью суши и нижележащими слоями, R_0 – радиационный баланс увлажненной поверхности, al – альбено поверхности, T_b – температура воздуха.

Видно, что на температуру поверхности, кроме альбено, влияют одинаковое количество факторов в разных природных зонах. Рассмотренный выше подход позволяет разделить их на два типа (механизма) – радиационный и эвапотранспирационный.

В качестве примера сравним по данным измерений структуру теплового баланса в пустыни Гоби (Монголия) и субарктической пустыни (окрестности Тикси). Поверхность в обоих случаях представлена смесью щебнистого и каменистого субстратов. Сплошной почвенный покров отсутствует. Альбено в арктической пустыне равно 0.18, а в Заалтайской Гоби составляет 0.16, что несколько меньше, чем в субарктической пустыне. (Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах..., 2007). Результаты радиационно-градиентных полевых измерений в Заалтайской Гоби (июль 1982 г) показали, что почти все тепло радиационного баланса затрачивается на прогрев атмосферы. Испарение практически отсутствует. Температура поверхности регулируется в основном альбено (Золотокрылин, 2003). Полевые наблюдения в субарктической пустыне (окрестности Тикси) летом 1998 г (Kodama et al., 1998) и дополнительно градиентные в июле 1999 г. (Казанский, Золотокрылин, 2004), показали, что отношение Боуэна в полуденные часы здесь достигало 3.5, т.е.

поток явного тепла значительно превышал поток скрытого. Это говорит в пользу радиационного регулирования температуры поверхности в период наблюдений, как и в случае с Заалтайской Гоби.

Выводы

Корреляционная связь спектральных характеристик поверхности: альbedo и температуры в горной и арктической тундре Новой Земли в июле мало зависит от тренда температуры воздуха и температурных аномалий и отрицательна во все годы. Такая связь обусловлена преобладающей растительностью (мхи, лишайники) и щебнисто-каменистой поверхностью. Таким образом, радиационный механизм регулирования температуры поверхности доминирует в ледниковых и полярно – пустынных ландшафтах Арктики и Субарктики. Он выражается в отрицательной корреляции между альбедо и температурой поверхности. С некоторыми ограничениями его можно сравнить с радиационным механизмом регулирования температуры поверхности аридных ландшафтов с пустынной растительностью, где он также является преобладающим (Золотокрылин, 2003; Zolotokrylin et al., 2020).

В материковой тундре начинает преобладать эвапотранспирационный тип регулирования температуры поверхности по отношению к радиационному. Этому способствуют повышение среднемесячных температур воздуха до 15–16°C, что благоприятно сказывается на разнообразии растительности. В подзоне южной тундры и лесотундре связь альbedo и температуры поверхности зависит от высоты местности, экспозиции склонов и погодных условий, и особенно от экстремальных температурных аномалий.

В низинах (гидроморфных комплексах) в холодные годы на фоне переувлажнения преобладает радиационный тип регулирования температуры поверхности, а в теплые годы уменьшение влажности ведет к максимальному развитию растительности, и механизм связи может переходить в эвапотранспирационный. На возвышенностях наблюдается обратный процесс, что также связано с изменениями условий увлажнения. Поверхность на небольших возвышенностях в летних условиях, даже в холодные годы, наиболее прогрета и в кустарниковых и кочкарных тундрах наблюдается эвапотранспирационный тип регулирования температуры поверхности. В аномально теплые годы, даже небольшое иссушение угнетает растительность, что ведет к повышению альbedo и механизм связи Al–Ts уже идет по радиационному типу. То есть, в одном ландшафте возможно существование двух устойчивых положений равновесия связи спектральных свойств поверхности в зависимости от прихода солнечной радиации. Такое существование двух конкурирующих механизмов регулирования температуры поверхности уже отмечалось ранее для сухостепных и полупустынных ландшафтов (Корзухин, Золотокрылин, 2018).

В лесотундре, при повышении температуры воздуха и увеличении плотности и высоты растительного покрова, связь спектральных параметров Al и Ts ослабевает. Для отдельных форм рельефа это приводит (также, как и в южных тундрах) к возможности переключения эвапотранспирационного механизма

регулирования температуры поверхности на радиационный в годы с температурными аномалиями.

Работа выполнено в рамках темы Государственного задания № 0148-2019-0009 и при поддержке гранта РНФ № 16-17-10236.

Список литературы

Будыко М.И. 2020. Избранные работы. – Санкт-Петербург, ООО «Америт». Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Войкова, 206 с. ISBN 978-5-9500883-7-7.

Золотокрылин А.Н. 2003. Климатическое опустынивание. – Москва, Рос. акад. наук. Ин-т географии, 246 с. ISBN 5-02-006514-5.

Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. 2012. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель. – Аридные экосистемы, т. 18, № 4 (53), с. 5-12.

Казанский А.Б., Золотокрылин А.Н. 2004. О тепловом балансе поверхности тундры в области вечной мерзлоты – В кн.: Мат. Гляциол. Исслед., вып. 96, с. 119-122.

Корзухин М.Д., Золотокрылин А.Н. 2018. Малоразмерная модель системы климат – растительность для северной части Прикаспийской низменности. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 52-68. doi: 10.21513/2410-8758-2018-2-52-68.

Национальный атлас России 2004-2008. / Глав. ред. В.В. Свешников. – Москва, Роскартография, т. 2, с. 398-399.

Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Сафонова И.Н., Юрковская Т.К. 1999. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. / Отв. Ред. Г.Н. Огуреева – Москва, ЭКОР, 64 с.

Оке Т.Р. 1982. Климаты пограничного слоя. – Ленинград, Гидрометеоиздат, 360 с.

Тепловообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы. Субарктическая тundra. 2007. Монография – Москва, Тверь, ООО Издво «Триада», 576 с.

Титкова Т.Б., Виноградова В.В. 2015. Отклик растительности на изменение климатических условий в boreальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 12, № 3, с. 75-86.

Титкова Т.Б., Виноградова В.В. 2019. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 16, № 5, с. 310-323. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310.

Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. 2020. Спектральный портрет равнинных ландшафтов России. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 17, № 3, с. 117-126. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.

Хитун О.В. 2005. Зональная и экотопологическая дифференциация флоры центральной части Западно-Сибирской Арктики. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. – С. Петербург, с. 51-55.

Becker F. Bolle H.J., Rountree P.R. 1988. The international satellite land-surface climatology project. – Berlin, Free Unit. Press, 100 p.

Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H., Heijmans M.M., Maximov T.C., Berendse F. 2011. The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature. – Environmental Research Letters, vol. 6. No. 3, pp. 035502. DOI: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdex.doi.org%2F10.1088%2F1748-9326%2F6%2F3%2F03550210.1088/1748-9326/6/3/035502>.

Jia, G.J., Epstein H.E., Walker D.A. 2003. Greening of arctic Alaska, 1981-2001. – Geophys. Res. Lett., vol. 30(20), pp. 2067, doi:10.1029/2003GL018268.

Loarie S.R., Duffy P.B., Hamilton H., Asner G.P., Field C.B., Ackerly D.D. 2009. The velocity of climate change. – Nature, vol. 462(7276), pp. 1052-1055.

Kodama, Y., Kodama, Y., Ishii, Y., Nomura, M., Sato, N., Yabuki, H. and Ohata, T., 2000. Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, Eastern Siberia. – Act. Rep. GAME-Siberia 2000, pp.13-14.

Zolotokrylin A., Brito-Castillo L., Titkova T. 2020. Monitoring of the "island" of desertification in Sonora in the 21st century. – Journal of Arid Environments, No 178 (104147), pp. 1-13. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104147>. (accessed 18 September 2020).

Статья поступила в редакцию: 05.10.2020 г.

После переработки: 27.10.2020 г.

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF TUNDRA AND FOREST TUNDRA LANDSCAPES DURING THE YEARS OF SUMMER TEMPERATURE ANOMALIES

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

Institute of Geography of RAS,
29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russia;
*corresponding author: titkova@igras.ru

Abstract. The warming at high latitudes, remaining in recent years, has a direct impact on arctic and subarctic landscapes. Possible changes of this landscapes under the climate warming are closely related with regulatory mechanisms for the underlying surface temperature. The circumstances of forming radiation and evapotranspirational regulatory mechanisms for the surface temperature were explored for tundra (from arctic to southern) and forest tundra landscapes of Novaya Zemlya and Western Siberia. The MODIS data of surface spectral characteristics were used, and more specifically albedo (Al) and surface temperature (Ts) for July 2000-2019.

The work shows that the radiation regulatory mechanism of the surface temperature is dominated in glacial and polar desert landscapes of Arctic and Subarctic with a predominance of stony and rubble types of surfaces with lichens. At the same time, radiative surface temperature control mechanism in mountain and arctic tundra of Novaya Zemlya almost does not depend on weather anomalies and so far has a little implication for the temperature trend.

In the mainland and forest tundra, the evapotranspirational regulatory mechanism for the surface temperature starts to prevail. This is supported by the increasing of monthly average air temperatures to 15-16°C, which is beneficial to the vegetation diversity. In subzones of the southern and forest tundra, the connection of albedo and surface temperature depends on altitudes, slope exposure and especially on extreme temperature anomalies. In basins, or hydromorphic complexes, in cold years against the backdrop of wetlands the regulatory mechanism for the surface temperature prevails, and in warm years the humidity decreasing leads to the highest vegetation development and the connection type can turn into the evapotranspirational one. On the high grounds the return process is observed, which is also connected with the changes in humidification conditions. In forest tundra, where the air temperature rises and the canopy height increases, the evapotranspirational mechanism of spectral parameters $Al-Ts$ connections is weakening. As a result, in southern and forest tundra two balanced steady states of the connection types of surface spectral characteristics can exist in relation to lighting conditions and temperature anomalies.

Keywords. Arctic, tundra, forest-tundra, surface temperature, albedo, spectral characteristics of the landscape.

References

- Budyko M.I. 2020. *Izbrannye raboty* [Selected works]. St. Petersburg, "Amerit", Main Geophysical Observatory im. A.I. Voeikova, 206 p. ISBN 978-5-9500883-7-7.
- Zolotokrylin A.N. 2003. *Klimaticeskoe opustynivanie* [Climatic desertification]. Moscow, Ros. akad. nauk, 246 p. ISBN 5-02-006514-5.
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. 2012. Sputnikovyj indeks klimaticeskikh ekstremumov zasushlivykh zemel' [Satellite climate extremes index of drylands]. *Aridnye ekosistemy – Arid ecosystems*, vol. 18, no. 4 (53), pp. 5-12.
- Kazansky A.B., Zolotokrylin A.N. 2004. O teplovom balanse poverhnosti tundry v oblasti vechnoj merzloty [On the thermal balance of the tundra surface in the permafrost area]. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij – Materials of Glaciological Research*. Moscow, vol. 96. pp. 119-122.
- Korzukhin M.D., Zolotokrylin A.N. 2018. Malorazmernaya model' sistemy klimat – rastitel'nost' dlya severnoi chasti Prikaspiskoi nizmennosti [A low-dimensional model of climate – vegetation system of the northern part of Caspian depression]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 52-68. doi: 10.21513/2410-8758-2018-2-52-68
- Natsional'nyi atlas Rossii* [The National Atlas of Russia], Ed. Sveshnikov V.V., 2004-2008, Moscow, Roskartografija. Vol. 2, pp. 398-399.
- Ogureeva G.N., Miklyaeva I.M., Safronova I.N., Yurkovskaya T.K. 1999. *Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorii* [Zones and types of vegetation zonation in Russia and adjacent territories]. Otv. Red. G.N. Ogureeva, Moscow, 2 p.
- Teplovodoobmen v merzlotnyh landshaftah Vostochnoj Sibiri i ego faktory. Subarkticheskaya tundra.* [Heat and water exchange in permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors. Subarctic tundra]. 2007. Monograph. Moscow-Tver. OOO Publishing House "Triada", 576 p.
- Oke T.R. 1982. *Klimaty pogranichnogo sloya* [Boundary layer climates]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 360 p.
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. 2015. Otklik rastitel'nosti na izmenenie klimaticeskikh uslovii v boreal'nykh i subarkticheskikh landshaftakh v nachale XXI veka [The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, vol. 12, no 3, pp. 75-86.
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. 2019. Izmeneniya klimata v perekhodnykh prirodnnykh zonakh severa Rossii i ikh proyavlenie v spektral'nykh kharakteristikakh landshaftov [Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics].

Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space, vol. 16, no 5, pp. 310-323. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310.

Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. 2020. Spektral'nyi portret ravninnykh landshaftov Rossii [The spectral portrait of plain landscapes in Russia]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, vol. 17, no 3, pp. 117-126. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.

Khitun O.V. 2005. *Zonal'naya i ekotopologicheskaya differentsiatsiya flory tsentral'noi chasti Zapadno-Sibirskoi Arkтики* [Zonal and ecotopological differentiation of the flora of the central part of the West Siberian Arctic]. Candidate's thesis. St-Peterburg, pp. 51-55.

Becker F. Bolle H.J., Rountree P.R. 1988. The international satellite land-surface climatology project. – Berlin, Free Unit. Press, 100 p.

Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H., Heijmans M.M., Maximov T.C., Berendse F. 2011. The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature. – Environmental Research Letters, vol. 6. No. 3, pp. 035502. DOI: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdex.doi.org%2F10.1088%2F1748-9326%2F6%2F3%2F03550210.1088/1748-9326/6/3/035502>.

Jia, G.J., Epstein H.E., Walker D.A. 2003. Greening of arctic Alaska, 1981-2001. – Geophys. Res. Lett., vol. 30(20), pp. 2067, doi:10.1029/2003GL018268.

Loarie S.R., Duffy P.B., Hamilton H., Asner G.P., Field C.B., Ackerly D.D. 2009. The velocity of climate change. – Nature, vol. 462(7276), pp. 1052-1055.

Kodama, Y., Kodama, Y., Ishii, Y., Nomura, M., Sato, N., Yabuki, H. and Ohata, T., 2000. Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, Eastern Siberia. – Act. Rep. GAME-Siberia 2000, pp.13-14.

Zolotokrylin A., Brito-Castillo L., Titkova T. 2020. Monitoring of the "island" of desertification in Sonora in the 21st century. – Journal of Arid Environments, No 178 (104147), pp. 1-13. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104147>. (accessed 18 September 2020).