

Изменчивость альbedo снежного покрова – анализ спутниковых данных

Л.М. Китаев, Т.Б. Титкова

*Институт географии РАН,
109017, Москва, Старомонетный пер., 29
E-mail: lkitaev@mail.ru*

На основании анализа спутниковых и наземных данных выявлены закономерности изменчивости альbedo поверхности в связи с изменениями снежного покрова, температуры воздуха и растительности Восточно-Европейской равнины для периода 2000-2009 гг. Определен характер взаимосвязи пространственных и временных изменений параметров. На основе регрессионного анализа оценено соотношение вклада снежного покрова и растительности в изменчивость альbedo поверхности.

Ключевые слова: альbedo поверхности, снежный покров, растительность, значения NDVI, регрессия, бета коэффициенты.

Введение

Альbedo земной поверхности характеризуется большой изменчивостью – от нескольких процентов для водных поверхностей до 100% в полярных регионах (Альbedo и угловые характеристики..., 1981). Закономерности изменений этой величины имеют большое значение для расчета радиационного баланса и оценки изменений температурного режима подстилающей поверхности и атмосферы в целом. Привлечение данных дистанционного зондирования существенно повышает качество мониторинга поверхности. Задача проводимых исследований заключается в оценке на основе спутниковых данных сезонных пространственных изменений альbedo в связи с пространственными изменениями снежного покрова температуры и растительности.

Исходные данные и методика исследований

Для анализа изменчивости альbedo использовались данные MODIS NASA, пространственное разрешение 1000 м, дискретность 16 дней. Значения микроволнового излучения семи каналов осреднялись для темного и верхнего времени суток, альbedo поверхности рассчитано по модели MCD43 C3 версии 005 (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products; Jorgensen, Svirezhev, 2004):

$$A=(0.33183*b1+0.33121*b2+0.55177*b3+0.42514*b4+ 0.48087*b5+0.25252*b7)*0.01,$$

где $b1 = 0.47\mu\text{m}$, $b2 = 0.55\mu\text{m}$, $b3 = 0.67\mu\text{m}$, $b4 = 0.86\mu\text{m}$, $b5 = 1.24\mu\text{m}$, $b7 = 0.3-0.7\mu\text{m}$.

Температура воздуха анализировалась по среднемесячным данным спутника MODIS/Terra, рассчитанным по модели MOD11 C3 версии 005, пространственное разрешение 0.5° (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products).

Характер пространственных изменений растительности оценивался по данным NDVI – нормализованного относительного индекса растительности (вегетационный индекс), как показателя количества фотосинтетически активной биомассы. Расчет данного показателя произведен на основе данных AVHRR NOAA (каналы 0.58-0.68 мкм и 0.72-1.00 мкм) по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра, *RED* – в красной области спектра (<https://www.osdpd.noaa.gov/ml/land/gvi.html>).

Среднемесячная температура воздуха получена путем обработки спутниковых данных MODIS /Terra (пространственное разрешение 0.05°) модельными расчетами MOD11 C3 версии 005 (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products). Изменчивость высоты снежного покрова оценивались по данным наблюдений метеорологических станций.

Для снегозапасов и альбедо использованы значения на последнюю дату ноября, декабря, января и февраля, для температуры воздуха – среднемесячные значения, которые осреднялись для периодов 2000-2004 гг. и 2005-2009 гг. Для *NDVI* использованы средние за 2000-2004 гг. и 2005-2009 гг. значения июня, именно на это время приходится максимум биомассы, что наиболее адекватно характеризует пространственное распределение растительности. Все данные интерполировались в узлы регулярной сетки 1x1° (Попова, 2004) на территорию Восточно-Европейской равнины.

Изменчивость альбедо поверхности

В качестве примера разнообразия альбедо снежного покрова можно привести данные Гляциологического словаря (1984): свежеснежный – 80-95 %; мелкокристаллический, переметенный – 65-80 % ; мелкозернистый, слегка влажный – 55-65 % ; средне- и крупнозернистый, слегка влажный – 35-45 %. Разброс величин связан с сезонными и региональными особенностями изменений снежной толщи. Пространственная изменчивость значений альбедо, рассчитанных на основе спутниковых данных в целом соответствует приведенным выше данным (рис. 1 и 2). Увеличение альбедо с юго-запада на северо-восток соответствует увеличению в этом направлении толщины снежного покрова. Однако, изменения альбедо поверхности и толщины снега от месяца к месяцу имеют разную направленность. Толщина снега растет, происходит сглаживание микрорельефа, уходит под снег низкорослая травянистая и кустарниковая растительность, что должно было бы способствовать усилению отражательной способности поверхности. Но альбедо, тем не менее, снижается (рис. 1-4), что связано, вероятнее всего, с изменением к февралю характера снежной поверхности вследствие перекристаллизации, появления неровностей за счет переметания снега, загрязнения и повышенной влажности в относительно теплых условиях на западе и юге региона. Снижение величины альбедо поверхности от ноября к февралю составило в 2000-2004 гг. 20%, в 2006-2009 гг. – 13 %.

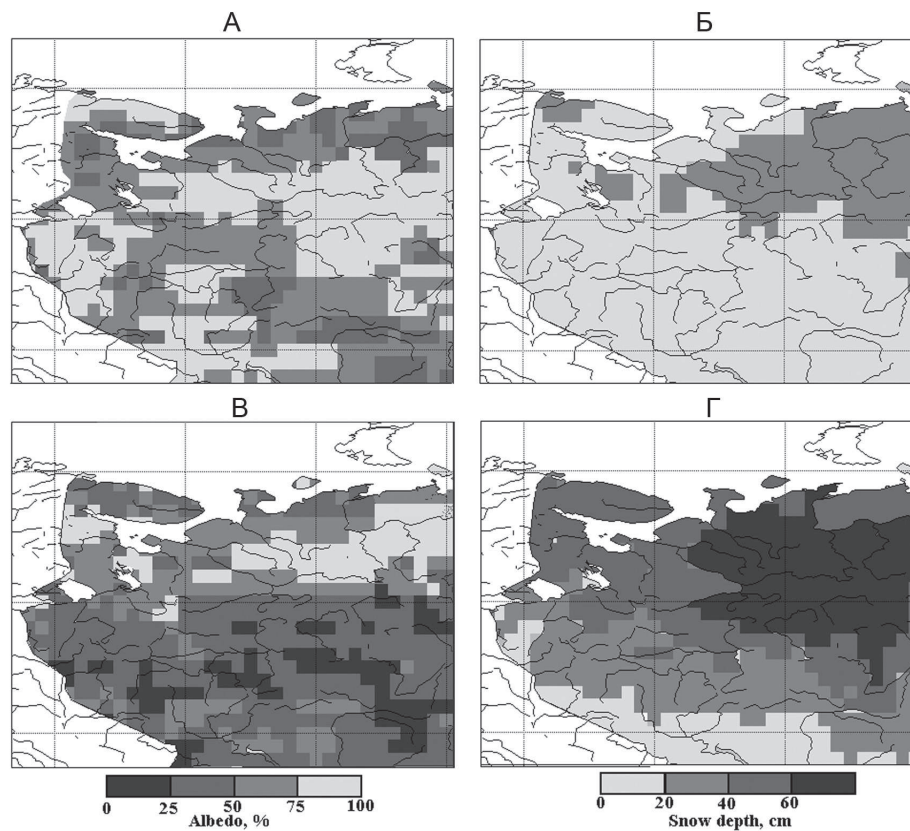


Рис. 1. Пространственное распределение альbedo, % и толщины снежного покрова, см за 2000-2005 гг.: среднемноголетние значения декабря (А и Б) и февраля (В и Г)

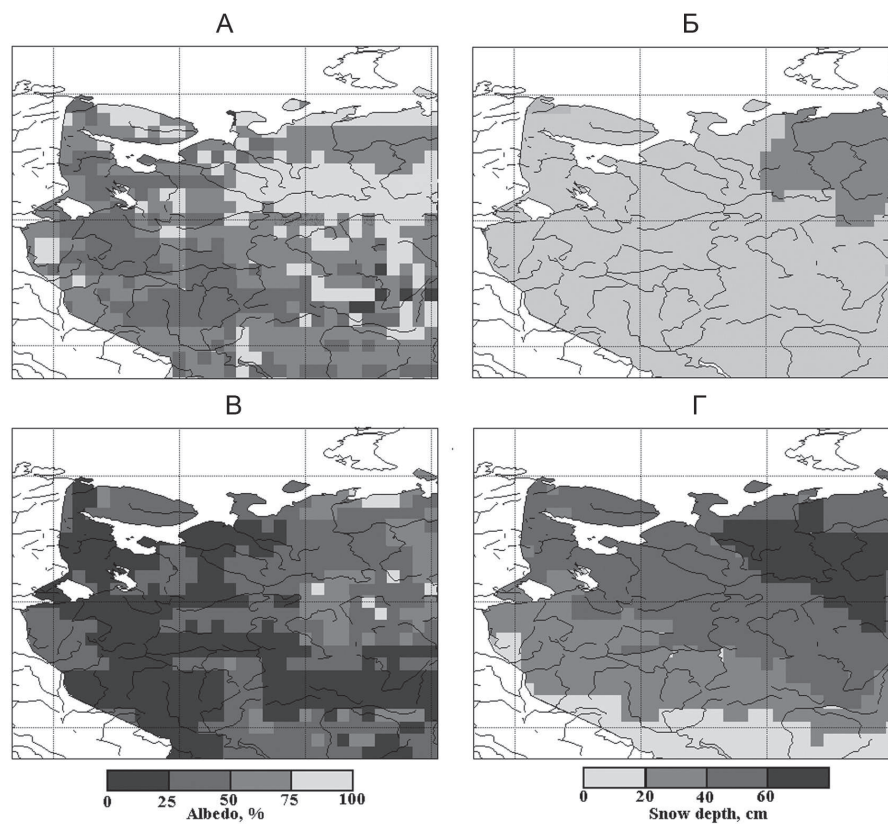


Рис. 2 Пространственное распределение значений альbedo % и толщины снежного покрова см за 2006-2010 гг.: среднемноголетние значения для декабря (А и Б) и февраля (В и Г)

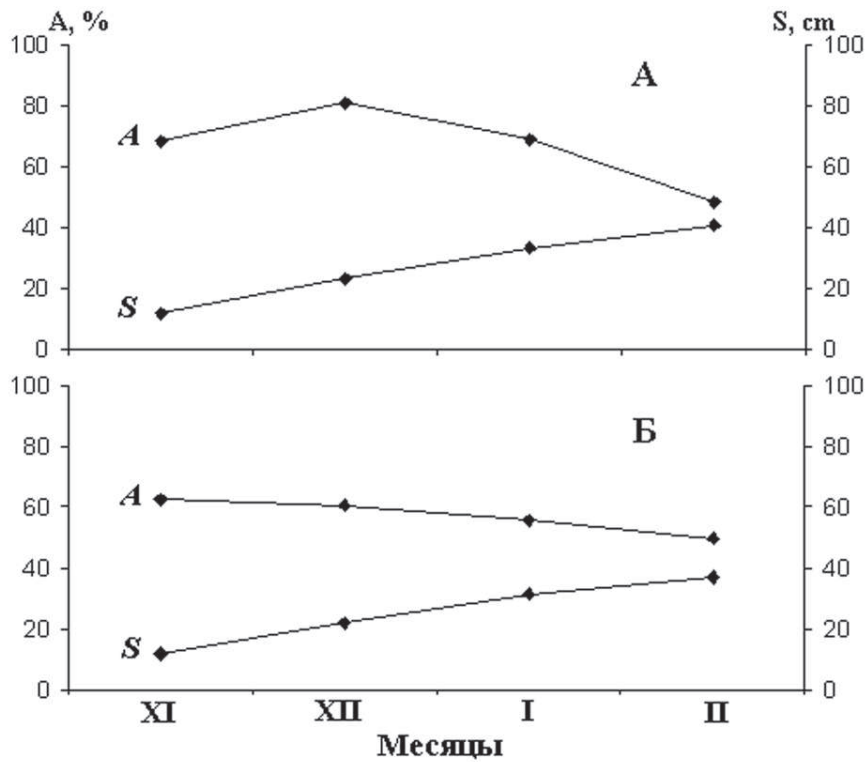


Рис. 3. Изменение среднемноголетних месячных значений альbedo, % (A) и толщины снежного покрова, см (S) для 2000-2005 гг. (A) и 2005-2010 гг. (B)

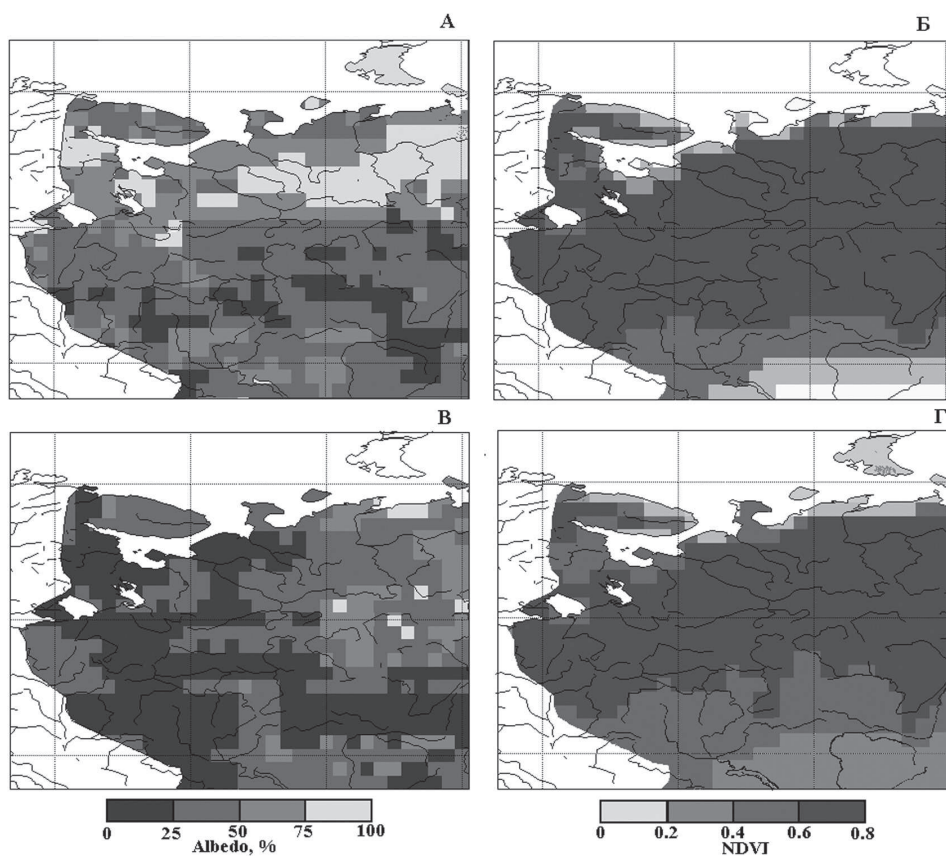


Рис. 4. Пространственное распределение среднемноголетних значений альbedo, % февраля и значений NDVI: 2000-2005 гг. - A и B; 2005-2010 гг. - В и Г

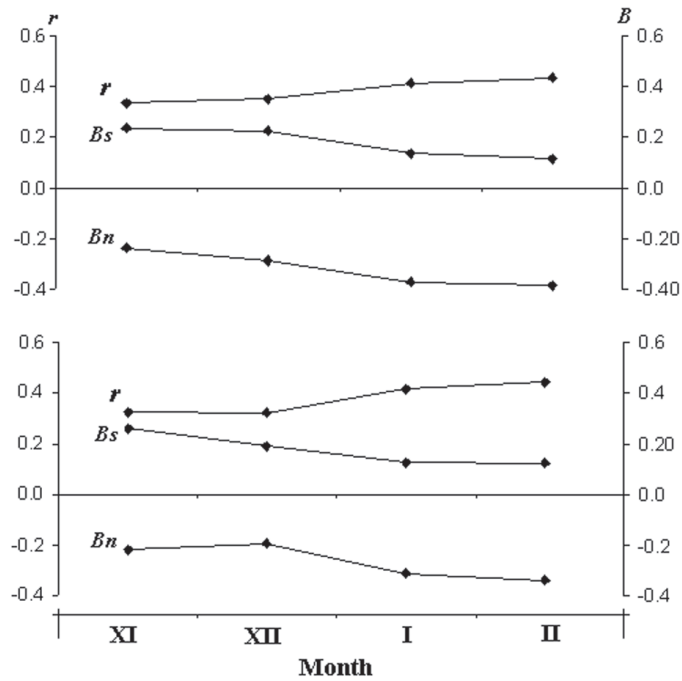


Рис. 5. Изменение месячных коэффициентов регрессии альbedo от толщины снежного покрова и альbedo (r) и бета коэффициентов регрессионного уравнения для толщины снежного покрова (Bs) и NDVI (Bn) для 2000-2005 гг. (А) и 2005-2010 гг. (Б)

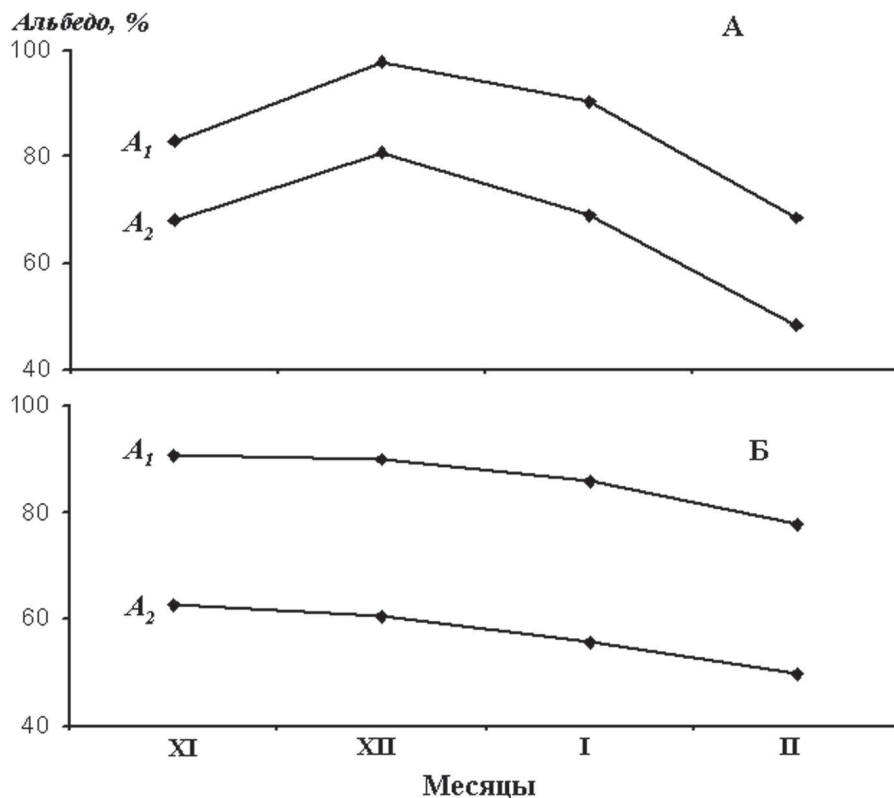


Рис. 6. Пространственное распределение среднемноголетних значений альbedo, % декабря 2006-2010 гг. (А) и значений NDVI. (Б)

Связь изменений альbedo поверхности и температуры воздуха в приземном слое оказалась несущественна: анализ корреляции, проведенный для всех месяцев, показал, что коэффициенты корреляции не превышают 0.25. По-видимому, в зимних условиях, при нали-

чии заснеженной поверхности, изменчивость температуры воздуха в первую очередь зависит от характера атмосферных циркуляционных процессов.

Характер влияния растительности на изменчивость альbedo поверхности зимнего периода исследован путем анализа множественной регрессии – зависимости альbedo от толщины снежного покрова и величины *NDVI*. Регрессионный анализ проведен для всех месяцев 2000-2004 и 2005-2009 гг. Коэффициенты регрессии невелики, располагаются в диапазоне 0.35-0.50 (рис. 5), но, в данном случае, интересны соотношения бета коэффициентов регрессионного уравнения. Бета коэффициенты толщины снега и значений *NDVI* имеют различный знак, что логично: снежный покров обеспечивает высокое альbedo, увеличение растительности на фоне снежной поверхности снижает его. И если в начале зимы, при свежеснегавшем снеге, абсолютные значения бета коэффициентов близки по величине, то к февралю абсолютные значения бета коэффициентов значений *NDVI* больше абсолютных значений толщины снега. Из чего следует, что вклад в изменчивость альbedo поверхности снежного покрова падает от ноября к февралю в результате изменения характера его поверхности. В связи с чем, вклад растительности в изменение альbedo поверхности увеличивается – обратно пропорционально. И, в результате, ситуация соответствует закономерностям, иллюстрируемым рис. 2: с увеличением к февралю толщины снега альbedo поверхности падает.

Проведенный регрессионный анализ дает возможность статистически оценить роль растительности в изменении альbedo зимнего периода. Если удалить соответствующий значениям *NDVI* член регрессионного уравнения, то можно предположить, что рассчитанные таким образом значения альbedo поверхности будут определяться изменениями именно толщины снега. В этом случае альbedo поверхности всех исследуемых месяцев существенно увеличивается: в 1.2-1.4 раза для периода 2000-2004 гг. и в 1.4-1.6 раз для периода 2005-2010 гг.

Для детализации соотношения влияния толщины снежного покрова и растительности на распределение альbedo в пределах Восточно-Европейской равнины были исследованы территории в координатах 30-40° в.д. и 50-55, 55-60, 60-65° с.ш. Коэффициенты множественной регрессии для ноября и декабря оказались незначимы и в таблице 1 представлены коэффициенты только января и февраля.

Таблица 1. Регрессионная зависимость изменений альbedo от изменений снеготпасов (мм) и значений *NDVI**

Район	Месяц	Период 2000-2005			Период 2006-2010		
		Коэффициент детерминации	Бета коэффициенты		Коэффициент детерминации	Бета коэффициенты	
			Толщина снега (см)	NDVI		Толщина снега (см)	NDVI
50-55° с.ш. 30-40° в.д.	январь	<i>0.020</i>	0.079	-0.082	0.013	0.109	-0.028
	февраль	0.123	0.138	-0.075	0.021	0.024	-0.140
55-60° с.ш. 30-40° в.д.	январь	0.121	0.225	-0.189	0.106	0.259	-0.137
	февраль	0.170	0.259	-0.272	0.128	0.349	-0.163
60-65° с.ш. 30-40° в.д.	январь	0.328	0.585	-0.194	0.180	0.401	-0.152
	февраль	0.202	0.401	-0.278	0.226	0.243	-0.306

* Курсивом выделены незначимые коэффициенты уравнения регрессии

Прослеживается тенденция увеличения с юга на север положительных значений бета коэффициентов толщины снежного покрова и уменьшение отрицательных значений бета коэффициентов *NDVI*. Таким образом, имеет место усиление к северу влияния на изменение альbedo поверхности снежного покрова (прямое) и растительности (обратное), при этом для большинства месячных значений бета коэффициенты толщины снега больше, чем бета коэффициенты *NDVI*.

Выводы

На основании анализа спутниковых (альbedo, *NDVI*) и наземных (толщина снега) данных выявлены закономерности изменчивости альbedo поверхности в связи с изменениями снежного покрова, температуры воздуха и растительности Восточно-Европейской равнины. При увеличении от месяца к месяцу толщины снега величина альbedo от ноября к февралю снижается: в 2000-2004 гг. на 20%, в 2006-2009 гг. на 13 % – в связи с изменениями поверхности снежной толщи. Связь изменений альbedo поверхности и температуры воздуха в приземном слое оказалась несущественна, месячные коэффициенты корреляции не превышают 0.25. По-видимому, в зимних условиях, при наличии заснеженной поверхности, изменчивость температуры воздуха в первую очередь зависит от характера циркуляционных процессов.

По бета коэффициентам уравнения регрессии выявлен вклад в изменчивость альbedo поверхности толщины снега и растительности: от ноября к февралю вклад толщины снега уменьшается (прямо пропорционально), вклад растительности увеличивается (обратно пропорционально). Удаление члена регрессионного уравнения, связанного с растительностью, позволяет предположить, что для исследуемого региона растительный покров снижает альbedo поверхности в 1.3 – 1.6 раза. Для всех исследуемых месяцев выявлена тенденция увеличения с юга на север положительных значений бета коэффициентов толщины снежного покрова и уменьшение отрицательных значений бета коэффициентов *NDVI*. Следовательно, вклад снежного покрова (прямой) и вклад растительности (обратный) в изменения альbedo поверхности усиливаются к северу, причем в большинстве случаев в абсолютных значениях бета коэффициентов толщины снега больше бета коэффициентов *NDVI*.

Литература

1. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под редакцией К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 231 с.
2. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 527 с.
3. Попова В.В. Структура многолетних колебаний высоты снежного покрова Северной Евразии // Метеорология и гидрология, 2004. № 8. С. 78-88.
4. Jorgensen S.V., Svirezhev Y. M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems / Elsevier Ltd. The Boulevard, Oxford UK, 2004. 369 p.

Variability of snow cover albedo – the analysis of the satellite data

L.M. Kitaev, T.B. Titkova

*Institute of Geography RAS,
109017, Moscow, Staromonetny per., 29
E-mail: lkitaev@mail.ru*

Laws of variability albedo in connection with changes of a snow cover, air temperature and vegetation are revealed as result of the analysis of the satellite and ground data for East European plain in 2000-2009. Estimate of spatial and temporal changes of parameters interconnection is determined.

Keywords: albedo, snow cover, vegetation, NDVI, regression, beta coefficients.