

Воздействие изменения климата на горные ландшафты Северного Кавказа

В.В. Виноградова, Т.Б. Титкова, Е.А. Белоновская, Р.Г. Грачева

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: vvvinog@yandex.ru*

Изменения границ высотных горных поясов могут служить доказательством климатических изменений, а также являться следствием прекращения хозяйственной деятельности человека. В работе показана роль климатического фактора в наблюдаемых изменениях границ и состояния субальпийских ландшафтов Северного Кавказа, на которых наблюдалась трансформация системы землепользования. Тепло и влага являются лимитирующими факторами существования и изменения растительности. Оценка изменений тепло- и влагообеспеченности производилась для территории 42–44° с.ш. 42–45,5° в.д. с использованием вегетационного индекса (NDVI), индекса вегетационных условий (VCI), спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI), суммы активных температур (температура воздуха выше +10°C) и осадков. Установлено, что в начале XXI в. в предгорьях увлажнение уменьшается, а в районах среднегорий отмечается рост увлажнения. Оценка суммы активных температур и осадков для периода современного потепления (1981–2010 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (до потепления 1951–1980 гг.), показывает увеличение суммы активных температур и осадков, которые способствуют увеличению продуктивности растительных сообществ, о чем свидетельствует рост вегетационного индекса (NDVI) в начале XXI в. и восстановление естественных границ высотных ландшафтных поясов.

Ключевые слова: изменения климата, горные ландшафты, вегетационный индекс (NDVI), индекс вегетационных условий (VCI), спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI), сумма активных температур

Введение

Изменения климатических условий могут приводить к существенным сдвигам границ высотных горных ландшафтных поясов. Однако изменения границ могут быть также следствием прекращения хозяйственной деятельности, связанной с использованием горных экосистем. В настоящее время трансформация горного землепользования, прежде всего – горного животноводства, привела к резкому сокращению пастбищной нагрузки на горные травяные экосистемы Северного Кавказа.

Орографические особенности северного макросклона Большого Кавказа – чередование параллельно расположенных хребтов и межгорных котловин – обуславливает локальное перераспределение тепла и влаги на склонах различной экспозиции. Это приводит к четкой пространственной дифференциации растительного покрова, когда на влажных северных и западных склонах распространены леса, а на хорошо прогреваемых сухих склонах южной и восточной экспозиций – травяные сообщества горных степей и остепненных лугов.

На южных и восточных склонах межгорных котловин выделяют: горные степи, развитые в диапазоне высот 1100–1400 м над уровнем моря; горные луговые степи на высотах 1400–2000 м; горные остепненные луга – в пределах высот 2000–2400 м. На северных и западных склонах на месте вырубленных лесов возможно формирование послелесных лугов с элементами остепнения. (Асоян и др., 2013; Грачева, Белоновская, 2010).

В настоящее время в среднегорьях Северного Кавказа идут процессы восстановления естественных границ высотных поясов: расширение горно-лесного пояса и восстановление сосновых лесов на южных склонах; восстановление горных луговых степей и остепнен-

ных субальпийских лугов на месте бывших сельскохозяйственных террас и зарастание северных склонов березовым криволесьем. Целью работы является выявление климатической составляющей этих процессов.

Материалы и методика

Оценка изменений тепло- и влагообеспеченности территории производилась на основании спутниковых и наземных измерений. Для территории 42–44° с.ш. 42–45,5° в.д. для летнего сезона по спутниковым данным были построены карты вегетационного индекса (NDVI), индекса вегетационных условий (VCI) и спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI), а также проведена оценка линейного тренда VCI. Использовались данные (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table), центра LP DAAC NASA: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Для альбедо бралась модель MCD43 C1 версии 005 (данные спутников MODIS/Terra + Aqua BRDF/Albedo) с дискретностью 16 дней. Значения индекса растительности по модели MOD13C1 – варианта 005 по данным MODIS/Terra с периодичностью 16 дней. Для среднемесячной температуры поверхности использовалась модель MOD11 C2 версии 005 по спутнику MODIS/Terra с периодичностью 8 дней. По двум 8-дневным срокам вычислялось среднее значение за период 16 дней и идентичным периодам для альбедо и NDVI. Все параметры имеют разрешение 0,05 × 0,05° (в среднем 5600 × 5600 м). Анализировались данные за сроки: 9–25 мая, 26 мая – 9 июня, 10–25 июня, 26 июня – 11 июля, 12–27 июля, 28 июля – 12 августа, 13–28 августа для периода 2000–2013 гг.

Дополнительно для района проведения полевых исследований в Цейском и Уаллагкомского ущельях использовались данные NDVI (модель MOD13A3 по спутнику MODIS/Terra) за май – август 2000–2014 гг. с разрешением 1 × 1 км (территория 42,7–43° с.ш. 43,7–44° в.д.).

Вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) применяется в качестве индикатора состояния растительности. Он вычисляется по данным измерений отраженной поверхностью суши солнечной радиации радиометром MODIS с борта серии спутников Национального управления по океану и атмосфере США. Концепция вегетационного индекса базируется на разном отражении радиационных потоков растительным покровом в видимом (0,58–0,68 мкм) диапазоне солнечного спектра (канал K1) и ближнем инфракрасном (0,725–1,10 мкм) диапазоне (канал K2). Разности между оценками отражения в этих каналах с последующей нормировкой на их сумму используются для вычисления NDVI:

$$NDVI = K2 - K1 / K2 + K1. \quad (1)$$

Многочисленные работы свидетельствуют, что вегетационный индекс имеет высокую чувствительность к осадкам и коррелирует с запасами зеленой фитомассы (Prince, 1991; Tucker, 1986; Tucker, Newcom, 1991). Этот вывод подтверждается исследованиями на засушливых землях умеренных широт Евразии (Золотокрылин и др., 2000; Kogan, 1997; Zolotokrylin, 2003).

Индекс вегетационных условий (VCI) определяется следующим образом:

$$VCI_i = 100 (NDVI_i - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}), \quad (2)$$

где $NDVI_i$ – текущее месячное значение i года, а $NDVI_{\max}$ и $NDVI_{\min}$ – максимальное и минимальное значение NDVI в данной точке, соответственно (Kogan, 1987).

Индекс вегетационных условий изменяется от 0 до 100%, отражая изменения погодных условий вегетации от сухих до влажных. Условия считаются влажными и благоприятными для растительности на данной территории при $VCI > 70\%$. Изменения VCI в диапазоне 30–70% отражают близкие к норме условия увлажнения. Вызванные засухой неблагоприятные условия для растительности характеризуются $VCI < 30\%$.

Спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI) используется для выявления засух и переувлажнения после обильных осадков. Он представляет собой сумму отклонений от многолетнего среднего, NDVI, альбедо, температуры поверхности, нормированных на среднеквадратическое отклонение (Золотокрылин, Титкова, 2011; 2012):

$$SCEI_i = -(\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{s_i} / \sigma T_s) + (\Delta NDVI_i / \sigma NDVI), \quad (3)$$

где ΔA_i – аномалия альбедо за i год; σA – среднеквадратическое значение альбедо за базовый период (в данной работе базовый период был принят 2000–2013 гг.); ΔT_{s_i} – аномалия температуры поверхности за i год; σT_s – среднеквадратическое значение температуры поверхности за базовый период; $\Delta NDVI_i$ – аномалия NDVI за i год; $\sigma NDVI$ – среднеквадратическое значение NDVI за базовый период.

Значения, полученные по формуле, нормировались на их среднеквадратическое отклонение относительно базового периода (2000–2013 гг.), чтобы исключить незначимые («шумовые») значения индекса, т.е. значения, лежащие в диапазоне среднеквадратического отклонения. В этом случае анализировались только значения индекса менее –1 (засуха) и более 1 (переувлажнение).

В период, когда осадки и влажность почвы выше среднемноголетних значений, для засушливых земель характерны положительные аномалии NDVI и отрицательные аномалии альбедо и температуры поверхности. В этом случае индекс как функция аномалий биофизических параметров становится положительным (Золотокрылин, Титкова, 2011; 2012).

На основании ранее проведенных исследований с использованием индекса вегетационных условий VCI (Золотокрылин, Виноградова, 2007, 2010) были выбраны два контрастных по степени увлажнения периода начала XXI века. Период 2000–2006 гг. можно характеризовать как переходный от более влажного – конца XX века (1987–1999 гг.) к засушливому периоду 2007–2013 гг.

По данным NDVI и рассчитанным значениям индексов SCEI и VCI были построены карты для выбранных периодов, и карты изменения этих индексов в 2007–2013 гг. по сравнению, с 2000–2006 гг.

Для различных высотных поясов рассчитывались линейные тренды вегетационных индексов. Оценка значимости трендов проводилась по t-критерию Стьюдента.

По данным метеорологической сети была проведена оценка суммы активных температур (температура воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$) и осадков для периода современного потепления (1981–2010 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (до потепления 1951–1980 гг.) и отдельно для начала XXI века (2000–2010 гг.). Сумма активных температур рассчитывалась как сумма среднесуточных температур за те дни, когда она превышала установленный порог $+10^{\circ}\text{C}$. Суммы активных температур и осадков были рассчитаны по данным метеорологической сети климатического архива ВНИИГМИМЦД (Архив ВНИИГМИМЦД...).

Основные результаты и их обсуждение

Вегетационные индексы

Анализ карт индекса вегетационных условий (VCI), построенных для двух периодов 2000–2006 гг. и 2007–2013 гг. показывает, что для исследуемой территории ($42\text{--}44^{\circ}$ с.ш. $42\text{--}45,5^{\circ}$ в.д.) в первый – более влажный – период на большей части квадрата (на высотах 500–1000 м н. у. м.) отмечаются условия достаточного увлажнения – $\text{VCI} > 70\%$. И только на склонах Большого Кавказа индекс вегетационных условий значительно ниже, его значения составляют 40–60%, что соответствует нормальному увлажнению. Во второй – более засушливый – период для южной части ЕТР, ситуация меняется. В предгорьях увлажнение уменьшается и индекс VCI снижается на 5–10%, а в районах среднегорий и высокогорий он растет на 5–15% (рис. 1). Таким образом, среднегорья и высокогорья во второй период переходят в зону достаточного увлажнения и благоприятных условий вегетации.

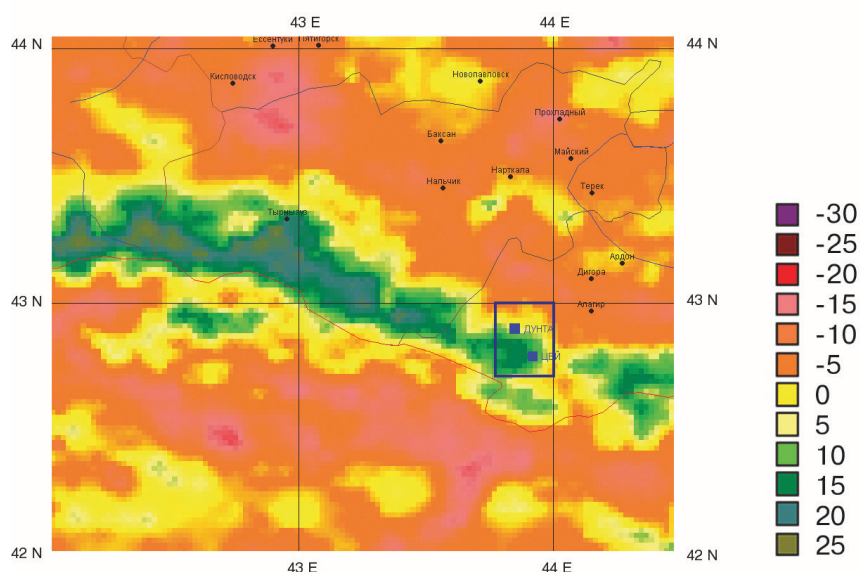


Рис. 1. Карта изменения индекса вегетационных условий (VCI) в 2007–2013 гг. по сравнению с 2000–2006 гг.

Карта линейного тренда VCI за 2000–2013 гг. подтверждает этот вывод (рис. 2). На ней хорошо видно, что практически на всей территории наблюдается рост засушливости. И только в горных районах отмечается рост увлажнения (рис. 2). Линейный тренд VCI положителен приблизительно с высоты 1500 м.

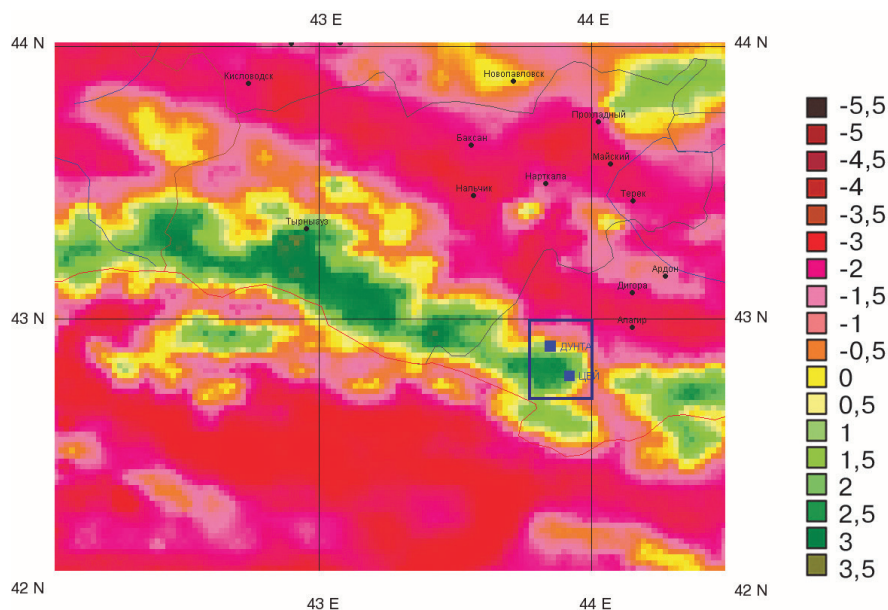


Рис. 2. Карта линейного тренда индекса вегетационных условий (VCI) 2000–2013 гг.

Карта спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI) показывает рост этого индекса во второй период в зоне среднегорий и высокогорий, где условия из засушливых становятся нейтральными и влажными. Индекс растет на 0,5–1,5 единицы. На остальной территории и, особенно, на равнине и в предгорьях – засушливость увеличивается, индекс уменьшается на 0,5–1,5 единицы (рис. 3).

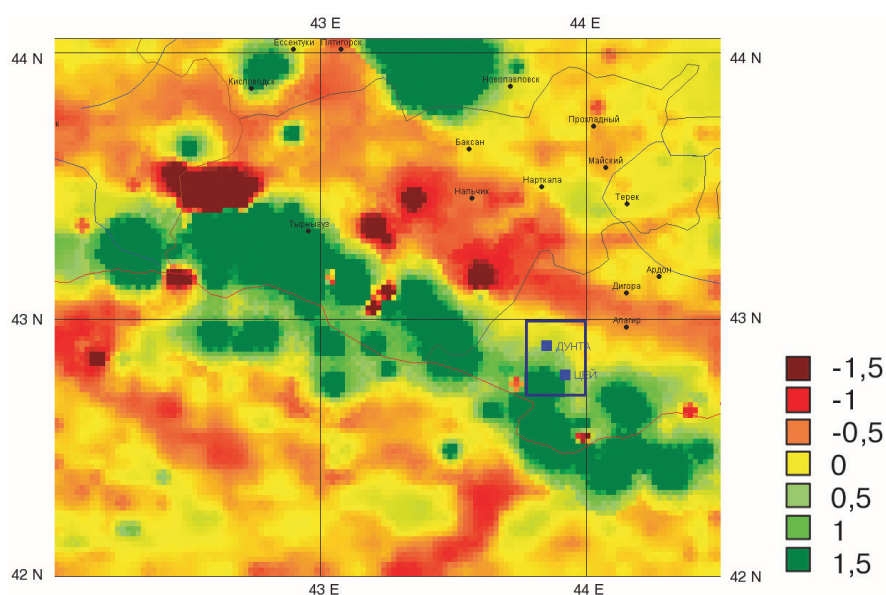


Рис. 3. Карта изменения спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI) в 2006–2012 гг. по сравнению с 2000–2005 гг.

Изменения вегетационного индекса (NDVI) в 2007–2013 гг. по сравнению с 2000–2006 гг. (рис. 4) иллюстрирует выявленные закономерности. Хорошо заметен рост вегетационного индекса в горном лесо-лугово-степном, субальпийском и альпийском поясах Большого Кавказского хребта. На остальной территории и, особенно, в районе Скалистого хребта, в предгорьях и на равнине вегетационный индекс уменьшается в начале XXI века (рис. 4).

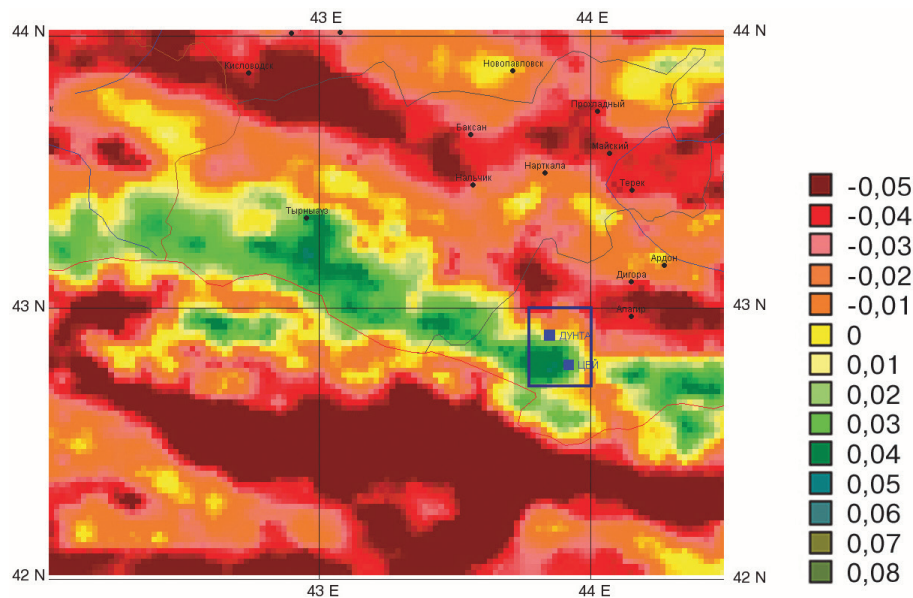


Рис. 4. Карта изменения вегетационного индекса (NDVI) в 2007–2013 гг. по сравнению с 2000–2006 гг.

Для более детального исследования закономерностей изменения вегетационных индексов в районах проведения полевых исследований (Цейское и Уаллагкомское ущелье) использовались данные NDVI с разрешением 1×1 км.

Карты вегетационного индекса (NDVI), построенные для территории $42,7\text{--}43^\circ$ с.ш. $43,7\text{--}44^\circ$ в.д., показывают рост NDVI и улучшение состояния растительности во второй период (2007–2014 гг.) на северном склоне Большого Кавказского хребта, в горно-луговом, субальпийском и альпийском поясах до высот порядка 2800 м н. у. м. Снижение NDVI наблюдается в верхних частях склонов южной экспозиции, оно особенно характерно для Скалистого хребта (рис. 5а).

В предгорьях и среднегорье тренд NDVI отрицательный, но при увеличении высоты его абсолютные значения уменьшаются, и с высоты 1800–2000 м н. у. м. он становится положительным и увеличивается, достигая максимальных значений в альпийском и субальпийском поясе на высотах 2800–3000 м н. у. м. В районах проведения полевых наблюдений максимальные положительные тренды NDVI в Цейском ущелье отмечались в альпийском поясе на склонах южной и юго-восточной экспозиции. В Уаллагкомском ущелье – на лугово-степных склонах южной и восточной экспозиции.

Анализ изменений индекса вегетационных условий (VCI) в начале XXI века показывает рост увлажнения и улучшение условий вегетации в горно-луговом, субальпийском и альпийском поясе (в зоне отступания ледников), приводящее к восстановлению раститель-

ности и зарастанию склонов. Значения индекса вегетационных условий в 2007–2014 гг. по сравнению с 2000–2006 гг. увеличиваются на 10–15% и соответствуют нормальному увлажнению. На высотах ниже 1000–1400 м и в районе Скалистого хребта этот индекс уменьшается на 10–15%, что приводит к ухудшению условий вегетации (рис. 4б).

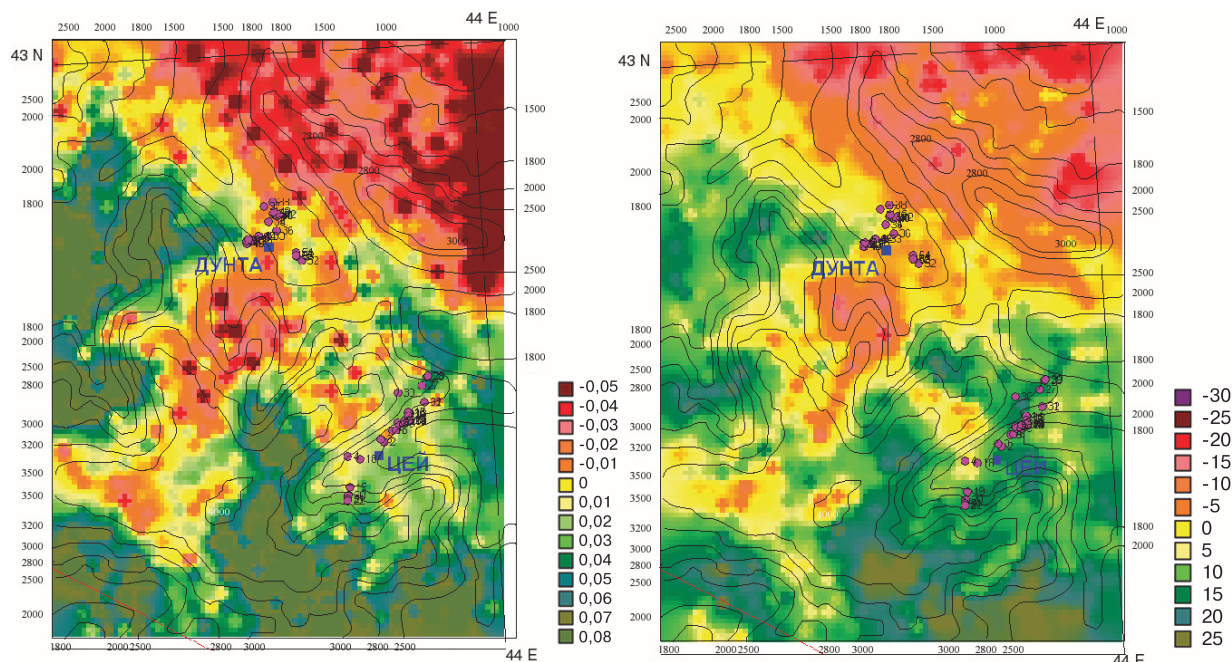


Рис. 5. Карта изменения вегетационного индекса (NDVI) (а) и индекса вегетационных условий (VCI) (б) в 2007–2014 гг. по сравнению с 2000–2006 гг. Изолиниями показана высота над уровнем моря

Как и для вегетационного индекса, можно отметить рост трендов VCI с высотой. Тренд становится положительным на высотах порядка 1400 м н. у. м и достигает максимума в альпийском поясе на высотах 2800–3000 м н. у. м (рис. 6).

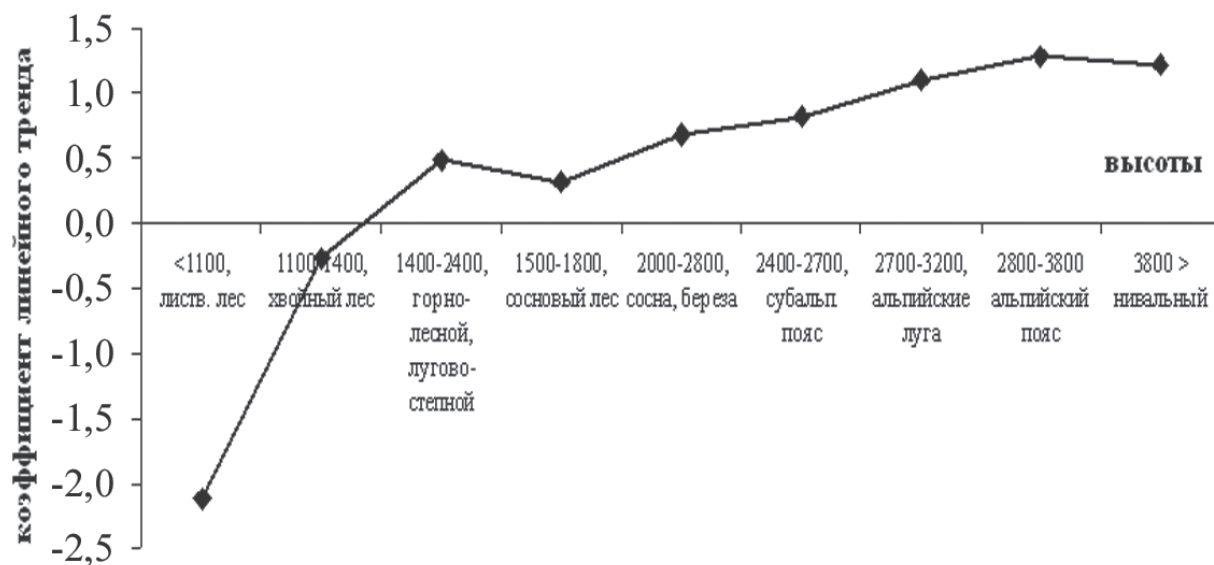


Рис. 6. Изменение линейного тренда индекса вегетационных условий (VCI) с высотой (2000–2014 гг.)

В Цейском ущелье максимальные тренды VCI наблюдаются на южных склонах от среднегорного до альпийского пояса, а в Уаллагкомском ущелье – в горно-лугово-степных ландшафтах на южных склонах и в березовом криволесье на северных склонах.

Метеорологические параметры

По данным метеорологической сети была проведена оценка суммы активных температур (температура воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$) и осадков для периода современного потепления (1981–2010 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (до потепления 1951–1980 гг.) и отдельно для начала XXI века (2000–2010 гг.). При потеплении климата на рассматриваемой территории наблюдается рост суммы активных температур на $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ как для равнинных станций, так и для станций, расположенных в среднегорье (табл. 1). В начале XXI века увеличение суммы активных температур продолжилось, причем более активно, на востоке территории и для станций, расположенных в среднегорье. Продолжительность периода активной вегетации увеличилась на 3–7 дней. Также в период современного потепления климата и, особенно, за последнее десятилетие практически на всей территории наблюдается увеличение сумм осадков как в целом за год, так и в летний период (табл. 1).

Таблица 1. Сумма активных температур и осадки по станциям до потепления и в период потепления

Станция	Высота, м	Сумма активных температур, $^{\circ}\text{C}$			Годовая сумма осадков, мм		
		1951–1980	1981–2010	2000–2010	1951–1980	1981–2010	2000–2010
Гудермес	74	3714,2	3862,8	4136,2	442,6	471,2	451,0
Пятигорск	538	3091,6			517,4	546,8	
Мин. воды	315	3192,2	3354,8	3525,1	421,4	505,1	517,3
Буденовск	134	3676,4	3777,1	3918,9	352,6	419,8	446,2
Владикавказ	702		2985,1	2984,6		907,9	941,2
Грозный	162	3646,5	3504,5	3446,3	434,7	487,3	595,5
Кисловодск	943	2684,3	2631,6	2780,6	586,6	664,3	672,1
Шаджатмаз	2070	737,7	929,9	1062,4	622,1	630,6	652,9

Таким образом, в горных районах Северного Кавказа изменения климатических условий, а именно – потепление, удлинение вегетационного периода и увеличение суммы осадков благоприятствует восстановлению растительности.

Проявление климатических изменений для горных ландшафтов Цейского и Уаллаг-комского ущелий Северной Осетии удалось установить в ходе проведения полевых исследований 2014 г.

В межгорных котловинах Северного макросклона Большого Кавказа формируется специфический микроклимат. В пределах котловин происходит перераспределение тепла и влаги по склонам различной экспозиции. Южные и восточные склоны котловин сильнее прогреваются, получая больше солнечной радиации, весной быстрее освобождаются от менее мощного снежного покрова, а летом получают меньшее количество влаги. Западные и северные склоны, напротив,греваются меньше, а осадков получают больше (Ефремов и др., 2001). В результате лесная растительность распространяется только на влажных северных и западных склонах. На хорошо прогреваемых сухих склонах южной и восточной экспозиций развиваются травяные сообщества горных степей и остепненных лугов.

Основные массивы травяных экосистем лесо-лугово-степного пояса в межгорных котловинах распахивались в течение многих столетий. Постепенное забрасывание пашни и трансформация ее в пастбищно-сенокосные угодья в документально датированных случаях позволяет предполагать, что длительность формирования современного растительного покрова в этом высотном поясе составляет 50–100 лет в зависимости от удаления от селений (Грачева и др., 2014).

Тенденции изменения ландшафтов и их хозяйственного использования для различных высотных зон и склонов разной экспозиции, а также спутниковые вегетационные индексы приведены в *табл. 2*. Из таблицы видно, что наблюдаемая динамика растительных покровов хорошо согласуется с тенденциями изменения спутниковых вегетационных индексов. Улучшение условий вегетации (VCI) и рост вегетационного индекса (NDVI) отмечаются практически для всех ландшафтов, кроме типичной горной степи, расположенной на сильно эродированных при выпасе крутых склонах, где развивается разреженный степной покров. На таких участках мы наблюдаем уменьшение индекса вегетационных условий (VCI). Линейный тренд VCI также отрицательный.

Для лесо-лугово степного, субальпийского и альпийского поясов в начале XXI в. характерны положительные тренды индексов VCI и NDVI и значимое увеличение этих индексов в 2007–2014 гг. по сравнению с 2000–2006 гг., свидетельствующие об улучшении условий вегетации. Это подтверждается расширением горно-лесных массивов, которое происходит в основном от верхних к нижним частям склонов, и пока затрагивает только послелесные разнотравно-злаковые луга, использовавшиеся преимущественно как сенокосы еще лет 20 назад. В субальпийском и альпийском поясах также наблюдается значимый рост вегетационного индекса (NDVI) и индекса вегетационных условий (VCI) и максимальные положительные тренды этих индексов, говорящие об улучшении условий произрастания травянистой растительности. Расширение альпийского пояса происходит также за счет зарастания склонов, освободившихся в результате таяния ледников.

Таблица. 2. Изменения горно-луговых ландшафтов под влиянием климата.

Ландшафт	Высота над уровнем моря, м	Склон	Индексы		Тенденция изменения ландшафта	Использование	
			NDVI среднее тренд разность*	VCI среднее тренд разность*		прошое	настоящее
Типичная горная степь	1200–1400	пологие и средне крутые южные склоны	0,72 0,002 0,01	52% –0,18 –3,6	Уменьшение увлажнения в верхних частях склонов. Слабая деградация растительности	Нижние части склона – пашня, верхние – сенокосы и пастбища	Сенокосы и пастбища
Горная луговая степь	1400–1800	пологие южные и юго-западные склоны	0,77 0,002 0,01	59% 0,25 1,1	Рост увлажнения и температуры. Восстановление растительности	Нижние части склона – пашня, верхние – сенокосы и пастбища	Сенокосы и пастбища
Березовое криволесье	1800–2000	северные и северо-восточные крутые склоны	0,68 0,002 0,01	56% 0,98 6,1	Рост увлажнения и температуры. Восстановление лесной растительности	Нижние части склона – пашня	Нижние части склона – пастбища
Горный лесо-лугово-степной	1400–2200	южные и юго-восточные	0,69 0,004 0,02	59% 2,3 15,0	Рост увлажнения и температуры. Восстановление соснового леса в верхних частях склона	Нижние части склона – пашня, верхние – сенокосы и пастбища	Пастбища, сенокосы
Суб-альпийские луга	2200–2600	южные	0,72 0,004 0,02	58% 2,2 16,2	Рост увлажнения и температуры. Восстановление луговой растительности	Пастбища	Недовыпасаемые пастбища
Альпийские луга	2700–3200	западные и юго-западные	0,61 0,006 0,05	56% 2,2 17,2	Рост увлажнения и температуры. Восстановление луговой растительности	Летние пастбища	Летние пастбища
Альпийский заросли рододендрона	2200–3200	северные	0,69 0,003 0,03	60% 0,5 8,5	Рост увлажнения и температуры. Отступление ледников. Заращение склонов.	Зона воздействия ледников	Рекреационные территории

* Изменения в 2007–2013 гг. по сравнению с 2000–2006 гг.

Выводы

Для рассматриваемого региона в начале XXI века наблюдается рост суммы активных температур и увеличение осадков, которое неоднозначно проявляется в разных высотных поясах. В предгорьях и до высот порядка 1000 м над уровнем моря отмечается увеличение засушливости и ухудшение условий вегетации. В зоне среднегорий и выше происходит рост увлажнения и улучшение условий вегетации.

В начале XXI века в горно-луговом, субальпийском и альпийском поясе наблюдается улучшение вегетационных условий, приводящее к восстановлению зонально-обусловленного растительного покрова и облесению склонов. На высотах ниже 1000–1400 м и на равнине отмечается ухудшение условий вегетации и рост засушливости. Значимые тренды вегетационного индекса (NDVI) и индекса вегетационных условий (VCI) становятся положительным на высотах порядка 1400 м н. у. м и достигают максимума в альпийском поясе на высотах 2800–3000 м н. у. м.

Таким образом, климатические изменения и ослабление хозяйственной деятельности на рассматриваемой территории действуют однонаправленно и будут способствовать восстановлению растительности в зоне среднегорий и высокогорий и, в частности, горно-луговых ландшафтов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05 00233А.

Литература

1. Архив ВНИИГМИ-МЦД, <http://www.meteo.ru>
2. Асоян Д.С., Белоновская Е.А., Чернавская М.М. Межгорные котловины Северной Осетии-Алании // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 3. С. 71–85.
3. Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 162–172.
4. Грачева Р.Г., Белоновская Е.А. Современное состояние пасторальных экосистем Центрального Кавказа // Известия РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 90–102.
5. Грачева Р.Г., Белоновская Е.А., Шоркунов И.Г. Преобразованные ландшафты Центрального Кавказа // Геоморфологи. 2014. Вып. 5. С. 78–93.
6. Ефремов Ю.В., Ильичев Ю.Г., Панов В.Д. Хребты Большого Кавказа и их влияние на климат. Краснодар: Просвещение-Юг, 2001. 145 с.
7. Золотокрылин А.Н., Коняев К.В., Титкова Т.Б. Зависимость между аномалиями индекса вегетации и месячных сумм осадков в зоне умеренного и недостаточного увлажнения // Исследование Земли из Космоса. 2000. № 6. С. 74–78.
8. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Соотношение между климатическим и антропогенным факторами восстановления растительного покрова юго-востока Европейской России // Аридные экосистемы. 2007. Т. 14. № 33–34. С. 20–33.
9. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Исследование засухи на юго-востоке Европейской России в конце XX – начале XXI века по спутниковым данным. // ПЭММЭ 2010. Т. XXIII, С. 128–137.
10. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 14–22.
11. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель // Аридные экосистемы. 2012 Т. 18. № 4(53). С. 5–12.
12. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions // Proceedings of the 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. American Meteorological Society, West Lafayette, Indiana. 1987. P. 103–107.
13. Kogan F.N. Global Drought Watch from Space // Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. Vol. 78. P. 621–636.
14. Prince S.D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988 // Int. J. Remote Sensing. 1991. Vol. 12. P. 1301–1311.

15. Tucker C.J. Maximum normalised difference vegetation index images for Sub-Saharan Africa for 1983–1985 // Intern. Journ. Remote Sensing. 1986. Vol. 7, No. 11. P. 1383–1394.
16. Tucker C.J., Newcomb W.W. Mean and inter-year variation of growing-season normalised difference vegetation index for the Sahel 1981–1989 // Intern. J. Remote Sensing. 1991. Vol. 12. No. 6. P. 1133–1135.
17. Zolotokrylin A.N. Droughts: Causes, Occurrence, and Consequence // Natural Disasters. Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS PublishersCo. Ltd., 2003.

Impact of climate change on mountain landscapes of the North Caucasus

V.V. Vinogradova, T.B. Titkova, E.A. Belonovskaya, R.G. Gracheva

*Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: vvvinog@yandex.ru*

Changes in the boundaries of high-altitude mountain belts can be treated as a proof of climate change. These changes were caused by termination of human activities. The article demonstrates the role of climatic factors in changes of the boundaries and state of sub-alpine landscapes in the North Caucasus, where the transformation of land use system was observed. Heat and moisture are the limiting factors of vegetation existence. The estimate of changes in heat and humidity was made for the territory of 42–44N 42–44.5E using vegetation index (NDVI), the index of vegetation conditions (VCI), Satellite Climatic Extremes Index (SCEI) and the sum of active temperatures (air temperature above + 10 °C). In the foothills moisture decreases, whereas in the middle mountains the increase in moisture is observed. The estimate of the amount of active temperatures and precipitation for the period of modern warming (1981–2010) compared to the previous period (1951–1980) shows the increase of these parameters in the early twenty-first century. These changes cause the increase in vegetation. It is evidenced by the growth of vegetation index (NDVI) and regeneration of natural boundaries of altitude zones at the beginning of the twenty-first century in this area

Keywords: climate change, mountain landscapes, vegetation index (NDVI), index of vegetation conditions (VCI), satellite climatic extremes index (SCEI), sum of active temperatures

References

1. <http://www.meteo.ru>
2. Asoyan D.S., Belonovskaya E.A., Chernavskaya M.M. Mezhgornye kotloviny Severnoi Osetii-Alanii (Intermountain basins of North Ossetia-Alania), *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2013, No. 3, pp. 71–85.
3. Vinogradova V.V., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Dinamika uvlazhneniya i teploobespechennosti v perekhodnykh landshaftnykh zonakh po sputnikovym i meteorologicheskim dannym v nachale XXI veka (Dynamics of moisture and heat fluxes in the transition landscape zones from satellite and meteorological data at the beginning of the XXI century), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 162–172.
4. Gracheva R.G., Belonovskaya E.A. Sovremennoe sostoyanie pastoral'nykh ekosistem Tsentral'nogo Kavkaza (The current state of pastoral ecosystems of the Central Caucasus), *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2010, No. 1, pp. 90–102.
5. Gracheva R.G., Belonovskaya E.A., Shorkunov I.G. Preobrazovannyye landshafty Tsentral'nogo Kavkaza (Transformed landscapes of the Central Caucasus), *Geomorfologi*, 2014, Issue 5, pp. 78–93.
6. Efremov Yu.V., Il'ichev Yu.G., Panov V.D. *Khreby Bol'shogo Kavkaza i ikh vliyaniye na klimat* (The ridges of the Greater Caucasus and their influence on the climate), Krasnodar: Prosveshchenie-Yug, 2001, 145 p.
7. Zolotokrylin A.N., Konyaev K.V., Titkova T.B. Zavisimost' mezhdru anomaliyami indeksa vegetatsii i mesyachnykh sum osadkov v zone umerennogo i nedostatochnogo uvlazhneniya (The relationship between vegetation index anomalies and monthly precipitation in temperate and insufficient moisture), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 6, pp. 74–78.
8. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. Sootnosheniye mezhdru klimaticheskimi i antropogennymi faktorami vosstanovleniya rastitel'nogo pokrova yugo-vostoka Evropeiskoi Rossii (The relationship between climatic and anthropogenic factors vegetation recovery south-east of European Russia), *Aridnye ekosistemy*, 2007, Vol. 14, No. 33–34, pp. 20–33.
9. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. Issledovanie zasukhi na yugo-vostoke Evropeiskoi Rossii v kontse XX – nachale XXI veka po sputnikovym dannym (The study of drought in the south-east of European Russia in the end of XX – the beginning XXI century from satellite data), *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2010, Vol. XXIII, pp. 128–137.
10. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Novyyi podkhod k monitoringu ochagov opustynivaniya (A new approach to the monitoring centers of desertification), *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 17, No. 3(48), pp. 14–22.

11. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Sputnikovyi indeks klimaticheskikh ekstremumov zasushlivykh zemel' (The satellite climatic extremes index of dryland), *Aridnye ekosistemy*, 2012, Vol. 18, No. 4(53), pp. 5–12.
12. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions. In Proceedings of the 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, *American Meteorological Society*, 1987, West Lafayette, Indiana. pp. 103–107.
13. Kogan F.N. Global Drought Watch from Space, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997, Vol. 78, pp. 621–636.
14. Prince S.D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988, *Int. J. Remote Sensing*, 1991, Vol. 12, pp. 1301–1311.
15. Tucker C.J. Maximum normalised difference vegetation index images for Sub-Saharan Africa for 1983–1985, *Intern. Journ. Remoute Sensing*, 1986, Vol. 7, No. 11, pp. 1383–1394.
16. Tucker C.J., Newcomb W.W. Mean and inter-year variation of growing-season normalised difference vegetation index for the Sahel 1981–1989, *Intern. J. Remote Sensing*, 1991, Vol. 12, No. 6, pp. 1133–1135.
17. Zolotokrylin A.N. Droughts: Causes, Occurrence, and Consequence, In: *Natural Disasters. Encyclopedia of Life Support Systems*, EOLSS PublishersCo. Ltd., 2003.