

УДК 574.9/581.52

ИЗМЕНЕНИЕ NDVI ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА КАК ФУНКЦИЯ РЕЛЬЕФА И КЛИМАТА

© 2014 г. П. А. Шарый¹, Л. С. Шарая²

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290 г.Пуцино Московской области, ул. Институтская, д. 2

E-mail: p_shary@mail.ru

² Институт экологии Волжского бассейна РАН, 445003 г.Тольятти Самарской области,
ул. Комзина, д. 10

Поступила в редакцию 13.09.2013 г.

Для анализа связей вегетационного индекса NDVI горных лесов с климатом и рельефом в бассейне р. Кубань сформирована матрица средней многолетней температуры июля ($T_{июл}$) с шагом 500 м. Детальность карты, полученной на основе этой матрицы, обоснована тесной связью ($R^2 = 0.978$) температуры от метеостанций с рельефом. Показано, что средняя многолетняя температура июля значимо определяется не только высотой над уровнем моря, но освещенностью склонов и характеристиками долин. Для NDVI горных лесов в этом бассейне выявлена тесная нелинейная связь с $T_{июл}$. Выборки сосновых лесов вблизи ледников обнаруживают тесные нелинейные связи летнего NDVI с рельефом и удаленностью от ледников. Для широколиственных, мелколиственных и сосновых типов леса в бассейне выявлены экологические оптимумы $T_{июл}$ для темнохвойных лесов такой оптимум не установлен. В прогнозируемых оценках NDVI широколиственных лесов по климатическому сценарию E GISS к 2050 г. среднее значение NDVI может уменьшиться, поскольку температурный оптимум лесов передвинется в область высокогорного рельефа, который характеризуется менее благоприятными условиями для развития лесной растительности.

Геоморфометрия; действие климата и рельефа на NDVI лесов; экологические оптимумы; нелинейность связей; Северный Кавказ.

ВВЕДЕНИЕ

Лесная растительность следует переменным окружающей среды, таким как рельеф и климат, причем особенно ярко эта связь проявляется в горах, где климат сам тесно связан с рельефом. Связь температуры воздуха с рельефом не сводится к одной лишь зависимости ее от высоты над уровнем моря, географических широты и долготы местности, которые использовались для интерполяции данных метеостанций при формировании матрицы глобальной модели климата высокого (30") разрешения WoldClim [16]. Не менее важными для растительности являются экспозиция и крутизна склонов, а также особая роль горных хребтов и долин. Поэтому в нашей работе стояла задача осуществить интерполяцию данных метеостанций с надлежащим учетом этих переменных.

Вегетационный индекс NDVI (Normalized difference vegetation index, см. определение и

свойства NDVI в [17]) связан с содержанием хлорофилла в растительности, а потому нередко используется для оценки функциональной активности лесов. Поскольку растительность в горах меняется с высотой и на разных склонах и формах рельефа, представляет интерес вопрос, когда эта связь линейна по характеристикам рельефа, а когда существенна нелинейность. В геоморфометрии – науке о количественном анализе земной поверхности [10, 20] – введен расширенный набор 18 базовых морфометрических величин (МВ) [23], который позволяет статистически сравнивать NDVI с целым спектром числовых характеристик рельефа методами множественной регрессии, в том числе используя нелинейные выражения для независимых переменных. В ряде работ показано, что некоторые свойства лесных экосистем лучше описываются ранее не использовавшимися МВ, а также при учете нелинейных связей [6–9, 11].

Интерференция во влиянии на горные массивы лесов таких факторов среды, как климат и рельеф,

практически не изучалась численными методами. Между тем, этот вопрос оказывается важным в связи с прогнозом преобразований лесов в условиях меняющегося климата. Например, при прогнозе изменения лесов Швейцарских Альп их моделируют как монотонно поднимающиеся вверх при потеплении на ~500 м [18], без учета того, что рельеф в новой высотной области, благоприятной по температурным условиям, может иметь резкие градиенты, затрудняющие его освоение. В работе поставлена задача проведения одновременного учета климата и рельефа, выявления, существенно ли изменяются при этом прогнозные оценки преобразования горных лесов.

Для проведения расчетов и построения карт использовалась разработанная П.А. Шарым программа “Аналитическая ГИС Эко” [23].

МЕТОДИКА

Источником данных о рельефе были матрицы SRTM30 [21] высокого разрешения 30”, которые преобразовывались для горного Кавказа в матрицу разрешения 500 м в проекции Каврайского для Европейской России. Источником данных о климате явились усредненные за 40 лет показания 67 метеостанций; для осадков дополнительно привлекались данные 34 гидропостов.

Для анализа рельефа использовалась расширенная система базовых МВ, описание которых дано в [23]. Наряду с ними рассматривались еще несколько составных или преобразованных МВ, описанных в [11]. Например, экспозиция склонов A_0 для статистического сравнения требует преобразования, поскольку эта МВ циклическая и для нее 0° и 360° есть одно и то же – северные склоны; использовались значения синуса и косинуса A_0 (северная и восточная компоненты экспозиции, соответственно [12]). Кроме того, тестировались квадратичные и кубические члены высоты Z и крутизны GA . Эти члены центрировались [19] для уменьшения эффектов линейной зависимости между анализируемыми пространственными факторами (предикторами), то есть значения Z^2 заменялись на $(Z - Z_{CP})^2$, Z^3 – на $(Z - Z_{CP})^3$ и т.д. Так как распределение остатков регрессионной модели должно быть нормальным, применялись нелинейные преобразования некоторых МВ, описанные в [11]; преобразованные МВ помечены верхним индексом “П”.

Для анализа нелинейностей использовались 4 выборки по 200 точек для сосновых и темной хвойных типов леса, как они определены в электронной карте лесов России [2]; редкостой (с сомкнутостью крон < 40%) не учитывался; также

исключались из рассмотрения все участки местности с высотой меньше 500 м. С.А. Барталевым с соавт. были рассчитаны скорректированные на границы облаков и т.п. значения NDVI лета 2001 г. с разрешением в плане 250 м [3], а также матрицы типов леса [3, 13]. Их данные преобразованы нами к разрешению 500 м. Как известно (например, [15]), распределение NDVI отклоняется от нормального, поэтому для задачи о нелинейностях вместо NDVI использовалась переменная $(NDVI/NDVI_{CP})^5$, распределение которой ближе к нормальному ($NDVI_{CP}$ есть среднее по выборке). Для решения задачи о нелинейностях связей в качестве факторов среды использовались рельеф, климат, широта, долгота и наименьшее расстояние от точки наблюдения до ближайшей границы ледников, расположение которых оценивалось по топографическим картам.

Значимость линейной зависимости между предикторами (мультиколлинеарности) оценивалась по максимальному значению так называемых “факторов вспухания дисперсии” [19]. Если этот максимум был меньше 5.15, то мультиколлинеарность считалась незначимой, иначе данная комбинация предикторов или независимых переменных исключалась из рассмотрения [11], это связано с тем, что “независимые” переменные уже не могут считаться независимыми, и это может привести к неверному результату, выражающемуся чаще более высоким коэффициентом детерминации. Нормальность распределения зависимой или анализируемой переменной (отклика) оценивалась по графикам нормальной вероятности [19]. Этим же методом проверялась нормальность распределения остатков (ошибок) модели. Если распределение остатков значимо отклонялось от нормального, то производилось соответствующее нелинейное преобразование отклика. В целом эти регрессионные модели относятся к наиболее популярным сегодня, так называемым генерализованным линейным моделям (в действительности, нелинейным, см. [11]).

Отбор предикторов проводился перебором всех комбинаций для фиксированного числа предикторов (4 или 3); отбиралась комбинация предикторов с наибольшим значением коэффициента детерминации R^2 и, в отличие от приближенных подходов пошаговой регрессии, этот метод считается более корректным [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование климатических матриц на основе связей данных метеостанций и гидропостов с рельефом

Связь средней многолетней температуры июля $T_{ИЮЛ}$ горного Кавказа с рельефом описывалась уравнением регрессии:

$$T_{ИЮЛ} = -0.05927 \cdot Z_{-47.69} + 0.000006962 \cdot (X + Y)/2^{1/2}_{+6.39} + 0.04256 \cdot F(35^\circ, 225^\circ)_{+2.93} + 0.2771 \cdot kh^{\Pi}_{+2.53} + 26.00,$$

$$R^2 = 0.978 \text{ (Degr} = 0.7\%), P < 10^{-6}, \quad (1)$$

где Z есть высота, $(X + Y)/2^{1/2}$ – расстояние на северо-восток (X и Y – долгота и широта в метрах, соответственно), $F(35^\circ, 225^\circ)$ – относительная освещенность склонов с юго-запада, kh – горизонтальная кривизна (со знаком “+” описывает отроги, со знаком “-” – долины). Уравнение можно прочесть таким образом: если наблюдатель будет продвигаться вдоль изолинии высоты Z , наиболее высокие температуры он отметит на хорошо освещенных с юго-запада склонах ($+F(35^\circ, 225^\circ)$), расположенных на отрогах ($+kh$), которые находятся в крайних положениях на северо-востоке Северного макросклона Кавказа ($+(X + Y)/2^{1/2}$). Нижние индексы (t -статистики Стьюдента) описывают значимость каждого предиктора в модели, и чем больше модуль t -статистики, тем выше значимость предиктора. Согласно им, Z имеет наибольшую значимость, но значимы также и остальные предикторы. Юго-западный азимут 225° получен путем перебора всех значений азимута x (через 5°) в освещенности $F(35, x)$. Наибольший нагрев юго-западных склонов вызван запаздыванием прогрева нижних слоев почвы. Поскольку F зависит как от экспозиции, так и от крутизны склонов, а также учитывает тени [23], эта МВ может служить одной из надежных характеристик рельефа для описания терморегима склонов (см. подробнее [12]); связь R^2 со склонением Солнца над горизонтом (взятым равным 35°) очень слабая [11].

Согласно (1), при подъеме на 1 км $T_{ИЮЛ}$ падает на $\sim 6^\circ\text{C}$. Найденный R^2 показывает, что 98% пространственной изменчивости $T_{ИЮЛ}$ объясняется рельефом (Z , F и kh) и географической переменной $(X+Y)/2^{1/2}$. Верификация (проверка) модели проводилась по методике кросс-валидации Аллена [19], описание параметра $Degr$ и критерия $Degr < 50\%$ дано в [11]. При верификации модели выявлено, что деградация $Degr$ в новых точках наблюдения мала по этому критерию, то есть модель (1) имеет хорошую предсказательную силу в новых точках наблюдения, где не было измерений.

Для анализа связей NDVI с климатом и рельефом были также сформированы матрицы средней многолетней температуры января, осадков тепло-

го и холодного периодов, а также среднегодовых осадков. Для построения моделей распределения осадков Северный макросклон был разделен на несколько частей из-за дождевых теней и подобных явлений [4]. В целом, осадки менее тесно связаны с рельефом, чем температуры.

Нелинейности и экологические оптимумы NDVI

Анализировались 4 выборки хвойных лесов в бассейне р. Кубань по 200 точек: “Сосны-Х” располагались вдоль Главного водораздельного хребта, “Сосны-У” – поперек, “Сосны” – в промежуточном положении; выборка “Темнохвойные” была достаточно сильно удалена от ледников, поскольку елово-пихтовые леса в бассейне р. Кубань вблизи них не растут. Получены следующие уравнения регрессии, описывающие пространственную изменчивость NDVI для разных выборок хвойных лесов:

1) Выборка “Сосны-У” (в долине истоков р. Кубань, наиболее близка к горе Эльбрус)

$$(NDVI/NDVI_{CP})^5 = 0.5692 \cdot (D_{ЛЕДН}/D_{CP})^{2+23.26} - 1.529 \cdot 10^{-6} \cdot (Z - Z_{CP})^2_{-9.19} + 2.618 \cdot 10^{-9} \cdot (Z - Z_{CP})^3_{+7.09} - 0.0004910 \cdot Z_{-5.24} + 1.469;$$

$$R^2 = 0.813 \text{ (Degr} = 0.9\%), P < 10^{-6}. \quad (2)$$

2) Выборка “Сосны” (умеренно удалена от ледников)

$$(NDVI/NDVI_{CP})^5 = 0.4060 \cdot (D_{ЛЕДН}/D_{CP})^{2+15.89} - 0.0009431 \cdot Z_{-8.16} - 9.868 \cdot 10^{-7} \cdot (Z - Z_{CP})^2_{-5.97} + 1.959 \cdot 10^{-9} \cdot (Z - Z_{CP})^3_{+4.35} + 2.407;$$

$$R^2 = 0.707 \text{ (Degr} = 2.6\%), P < 10^{-6}. \quad (3)$$

3) Выборка “Сосны-Х” (расположена вдоль ледников)

$$(NDVI/NDVI_{CP})^5 = -0.00001163 \cdot (X - Y)/2^{1/2}_{-17.02} + 0.1053 \cdot T_{ИЮЛ+9.61} - 0.01823 \cdot (T_{ИЮЛ} - T_{ИЮЛ_{CP}})^2_{-4.29} - 0.2158 \cdot khe^{\Pi}_{-3.21} + 11.13;$$

$$R^2 = 0.746 \text{ (Degr} = 1.8\%), P < 10^{-6}. \quad (4)$$

4) Выборка “Темнохвойные” (вдали от ледников)

$$(NDVI/NDVI_{CP})^5 = -0.001022 \cdot Z_{-18.25} + 0.1377 \cdot H^{\Pi}_{+8.61} + 0.008947 \cdot F(35, 225)_{+6.67} - 0.0008245 \cdot P_{ГОД-5.46} + 2.994;$$

$$R^2 = 0,759 \text{ (Degr} = 1,3\%), P < 10^{-6}. \quad (5)$$

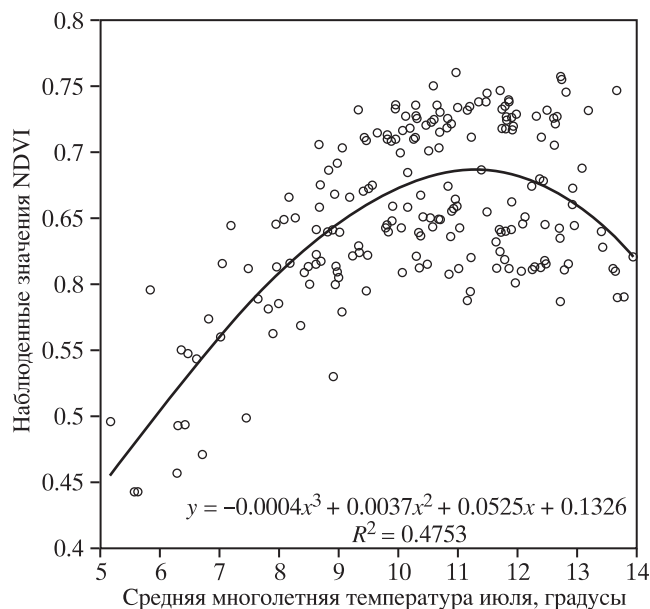


Рис. 1. Связь NDVI лета 2001 г. с температурой июля для выборки “Сосны-У”. Кривая показывает кубический тренд.

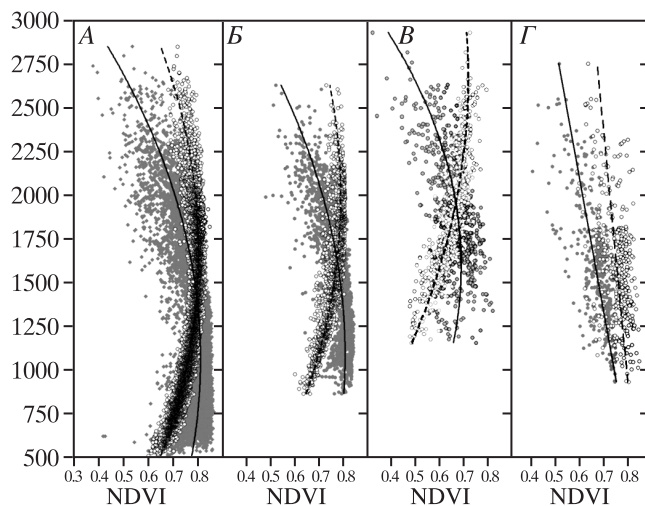


Рис. 2. Экологические оптимумы для четырех типов горных лесов Большого Кавказа: широколиственных (А), мелколиственных (Б), сосновых (В) и темнохвойных (Г). Сплошные тренды относятся к базовому сроку (2001 г.), светлые кружки и пунктирные линии – к прогнозу на 2050 г.

В уравнениях $D_{\text{ЛЕДН}}$ есть расстояние от ледников, $(X - Y)/2^{1/2}$ – расстояние на юго-восток, khe – МВ, описывающая расчлененность рельефа, H – МВ, описывающая средневыпуклые и средневогнутые формы рельефа [23], $P_{\text{ГОД}}$ – средняя годовая сумма осадков. Эти переменные среды объясняли от 70 до 81% пространственной изменчивости NDVI в исследуемых выборках хвойных лесов.

Из этих уравнений видно следующее. Для расположенной наиболее близко к ледникам поперек

хребта выборки “Сосны-У” связи NDVI с факторами среды нелинейны как по $D_{\text{ЛЕДН}}$, так и по высоте Z (преобладает роль квадратичного по Z члена). Для расположенной не столь близко к ледникам выборки “Сосны” связи с $D_{\text{ЛЕДН}}$ и Z нелинейны, но уже с преобладающей ролью линейного по Z члена. Для примерно более удаленной от ледников и расположенной вдоль хребта выборки “Сосны-Х” связь с $D_{\text{ЛЕДН}}$ незначима, преобладает линейная связь с Z . Для расположенной вдали от ледников выборки “Темнохвойные” все связи линейны. Такие результаты могут быть объяснены тем, что нелинейный характер связи NDVI с пространственными факторами возникает вблизи маргинальных условий: у границ ледников или экологической ниши.

Поясним последнее более детально. На рис. 1 видно, что в зависимости NDVI от $T_{\text{ИЮЛ}}$ наблюдается экологический оптимум, когда в небольшом диапазоне температур NDVI принимает максимальные и близкие к ним значения. Падающая низкотемпературная ветвь этой зависимости создается приближением к границам фундаментальной экологической ниши, которая определена низкими июльскими температурами, снижающими функциональные активности лесов. Падение же высокотемпературной ветви создается реализованной экологической нишей, то есть конкуренцией с расположенными ниже по склонам лиственными лесами. Отметим, что в отсутствие конкуренции сосны растут в гораздо более теплых условиях, чем при наблюдаемом здесь оптимуме, близком к 11°C. Такой оптимум нельзя принять как физиологически обусловленный, он вызван именно взаимодействием физиологических ограничений и конкуренции.

Отметим, что для лесов в бассейне р. Кубань аналогичный оптимум существует для широколиственных и мелколиственных лесов: однако его нет для темнохвойных лесов (рис. 2). Возможной причиной является то, что в бассейне елово-пихтовые леса редко произрастают близко к ледникам, и здесь фундаментальная экологическая ниша может играть для них много меньшую роль, чем реализованная.

На рис. 2 приведены также прогнозируемые на 2050 г. изменения NDVI горных лесов, включая будущие экологические оптимумы; это обсуждается в следующем разделе.

Взаимодействующее влияние климата и рельефа на горные леса

В этом разделе рассматриваются все леса горной части бассейна р. Кубань (высоты > 500 м), используются данные по типам леса и NDVI, по-

лученным более чем по 11000 площадкам. Наибольшую площадь занимают широколиственные леса (около 8500 площадок), площадь хвойных лесов в 9 раз, а мелколиственных – в 4.5 раза меньше. Для анализа связей NDVI лесов с климатом и рельефом были использованы трехпредикторные модели (из-за большого числа точек), с оценкой тесноты связи по непараметрическому ранговому коэффициенту корреляции Спирмана r_s и без расчета t -статистик. Предикторы в уравнениях, как и выше, упорядочены по значимости (первый – наиболее значимый) приближенным методом стандартизации уравнений регрессии [11, 19].

Поскольку из всех проверенных климатических характеристик для NDVI всего горного лесного массива и отдельных типов леса наибольшая связь выявлена с температурой июля, для оценки преобразования лесов со временем использовалась ее матрица. Матрица прогнозной модели июльской температуры была сформирована по данным климатического сценария E GISS для 2050 г. [22] следующим образом: исходная планетарная матрица преобразована с использованием метода триангуляции Делоне в матрицу с меньшим шагом – 0.5° . С помощью этой матрицы для каждой метеостанции получены значения изменений температуры к 2050 г. Полученные изменения суммировались с данными по многолетним средним значениям $T_{июль}$, а затем методом, описанным выше для уравнения (1), формировалась пространственная модель прогнозируемой температуры. В соответствии с данной моделью ожидается увеличение температуры июля в среднем на 3.2°C к 2050 г. по сценарию E GISS. Наибольшее изменение температуры ожидается в высокогорье.

Прогноз пространственного распределения NDVI лесов в 2050 г. осуществлялся путем замены в уравнении регрессии значений температуры базового периода на значения, предсказанные сценарием E GISS. Пространственное распределение прогнозируемой NDVI широколиственных и хвойно-широколиственных лесов (как этот тип леса определен в [2]) описывается следующим уравнением регрессии

$$NDVI = -0.365 \cdot (T_{июль} - T_{июль_{сп}})^2 + 0.138 \cdot kv + 0.032 \cdot T_{июль} + 0.714; r_s = 0.67; P < 10^{-6}. \quad (6)$$

Описанный выше температурный оптимум базового периода для NDVI горных широколиственных лесов оценен как 14°C с соответствующим этому оптимуму значением высоты около 1000 м (рис. 2). Рассчитанные по соответствующим моделям современная и прогнозная карты NDVI для

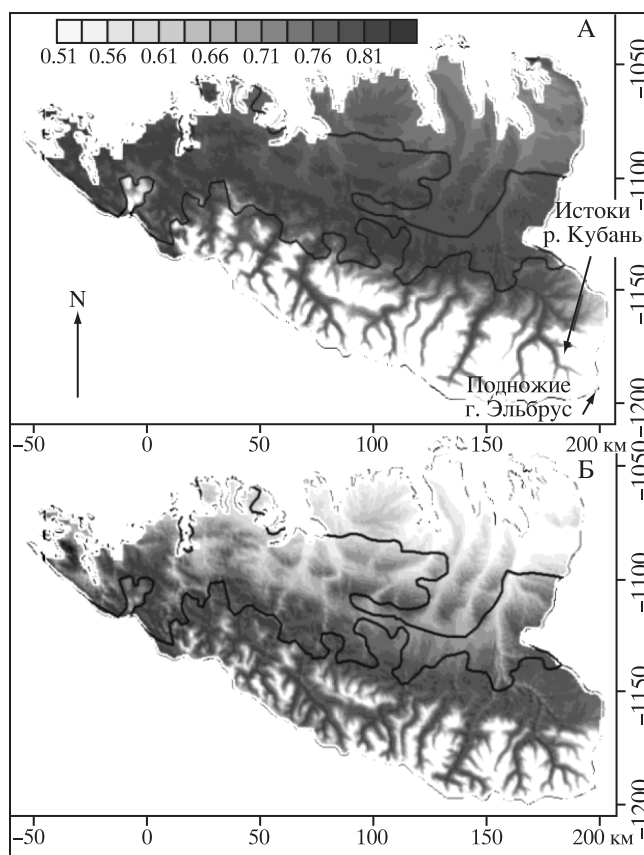


Рис. 3. Карты NDVI широколиственных лесов для базового периода (А) и для 2050 г. по модели E GISS (Б) для бассейна р. Кубань. Линией показана граница современного ареала широколиственных лесов. Легенда (единая для А и Б) описывает значения NDVI.

широколиственных лесов показаны на рис. 3. Несмотря на повышение $T_{июль}$ к 2050 г. для этого типа леса на 3.2°C , модель (6) дает снижение среднего значения NDVI к 2050 г. на 7%. Поскольку широколиственные леса теплолюбивы, полученный результат является указанием на существование факторов, ограничивающих использование широколиственными лесами в будущем преимущества возрастания температуры в горах.

В моделях лесов Швейцарских Альп, например, принималось, что все виды растительности будут подниматься вверх по склонам в связи с ожидаемым потеплением, предсказанным региональной климатической моделью горных Альп [18], на 1.5°C к 2050 г. и 3°C к 2100 г. Однако результаты нашего моделирования показывают, что высотный пояс, охватывающий оптимум климатических условий лесов, сместится вверх, где рельеф характеризуется более крутыми склонами, более резко выраженными гребнями, долинами. Эти новые, по-видимому, менее пригодные для произрастания широколиственных лесов, условия

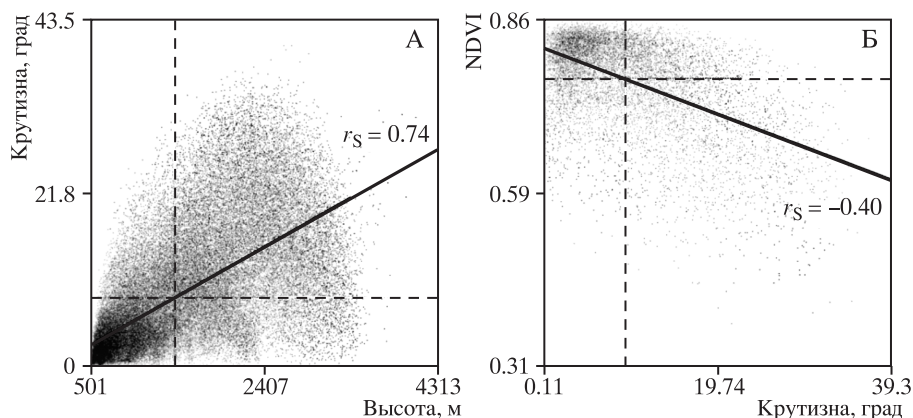


Рис. 4. Графики связи крутизны GA с высотой и с NDVI, иллюстрирующие, как специфика рельефа приводит к снижению NDVI в верхних частях гор. В горах бассейна р. Кубань GA растет с высотой (А), в то время как NDVI падает с GA (Б).

рельефа могут вызывать снижение функциональной активности лесов.

Определенным подтверждением этого может послужить рис. 4, где для территории бассейна р. Кубань показано: а) возрастание значений крутизны склонов с увеличением высоты; б) падение значений NDVI с ростом крутизны. Построенные нами графики, аналогичные графику на рис. 4, демонстрируют, что максимальная и минимальная крутизны, описывающие резко выраженные гребневые и килевые формы рельефа, возрастают по модулю с высотой и уменьшают NDVI широколиственных лесов. В целом вместо увеличения NDVI из-за потепления, как предсказывается в Альпах [18], модель (6) прогнозирует уменьшение NDVI на 7% из-за этих эффектов взаимодействия меняющегося климата и неизменного рельефа: по модели (6) в 2001 г. среднее NDVI составляло для этого типа леса 0.71, к 2050 г. оно составит 0.66. Моделирование показало, что для разных типов леса эти эффекты неодинаковы. Среднее NDVI сосновых лесов к 2050 г. значимо не изменится, NDVI мелколиственных лесов снизится на 3%, еловых возрастет на 13%.

“Тормозящая” роль рельефа возникает из-за того, что крутые склоны (крутизна 20–40° обычна в верховьях Кавказа [6]) неблагоприятны для роста лесов. Ф.А. Темботова с соавт. [5] отметили уменьшение за последние 20 лет площади горных бука и граба на склонах большой крутизны (20–40°) в Кабардино-Балкарии на 22–23%.

ВЫВОДЫ

1. Для анализа связей характеристик лесных экосистем, представленных значительными массивами спутниковых данных, с факторами окружающей среды необходимо использовать

соразмерные массивы данных по этим факторам. Детальные планетарные данные о климате с пространственным разрешением 600 м в умеренных широтах имеются в моделях WorldClim [16]. Эти модели описывают климат в горах высотой, широтой и долготой, однако они не учитывают важные для растительности переменные: освещенность и крутизну склонов, роль хребтов и долин. В представленной работе эти переменные использованы, включение их обосновано очень тесными статистическими связями климата и рельефа ($R^2 = 0.978$), а также их значимостью. Полученная модель успешно прошла верификацию по принятым критериям, что подтверждает ее надежность. Недостаточное внимание к ландшафтам в климатологических моделях (и больше всего к горным) отмечают В. Beckage с соавт. [14], которые для анализа изменения лесов за 40 лет во времени и пространстве использовали ежедневные измерения температур и осадков двух метеостанций. Реальные измерения существенно разошлись с данными климатических моделей.

2. Связь NDVI горных лесов с факторами среды тем более нелинейна по факторам среды, чем ближе условия произрастания лесов к маргинальным (близость ледников, конкуренция с другими типами растительности).

3. Следует отметить, что результаты прогноза состояния лесов для конкретного временного периода зависят от учета экологической инерции – задержки функциональных и структурных преобразований лесов вслед за климатическими изменениями. В нашей прогнозной модели мы используем характер связей лесов с климатом и рельефом, сформированный за длительный период относительно устойчивого климата, не учитывая время, необходимое как для внутренней перестройки экосистем, так и для изменения

их границ. Кроме того, возможны события, не предусмотренные описанными моделями: массовое нашествие насекомых-вредителей, резкие отклонения погоды от климатических сценариев, пожары и т.п. Прогноз NDVI лесов бассейна р. Кубань к 2050 г. по выбранному сценарию без учета рельефа приводит к результату, в котором условия произрастания широколиственных лесов становятся более благоприятными из-за потепления. При одновременном учете изменений климата и сохраняющегося практически неизменным в течение прогнозного срока рельефа появляется другой результат. Температурный оптимум лесов сдвигается вверх по склонам почти на 500 м, но в новой области леса принципиально не могут поддерживать такую же, как в базовый период, фотосинтетическую активность из-за возросшей крутизны склонов, чаще встречающихся резко выраженных форм рельефа. Иными словами, рельеф будет “тормозить” освоение лесами новых высотных поясов, в которых будут располагаться прогнозируемые температурные оптимумы, и тем самым по своему действию приведет в целом к снижению NDVI. Эти особенности справедливы для случаев нелинейных связей фотосинтетической активности лесов с климатом. При линейных же связях результат будет противоположным, как с елово-пихтовыми лесами. Прогнозные оценки изменения лесов зависят от конкретных моделей и используемых климатических сценариев, но общий вывод о важности учета влияния на растительность взаимодействующих между собой климата и рельефа остается справедливым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Луян Е.А., Толпин В.А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
2. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Потанов П.В., Турубанова С.А., Ярошенко А.Ю.* Карта лесов Российской Федерации, окрашенная по преобладающим группам пород деревьев и сомкнутости древесного полога. Масштаб 1 : 14 000 000, 1 лист. М.: ИКИ РАН, 2004.
3. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
4. *Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Ценкова Н.Л., Сурова Н.А.* Высокогорная экология в моделях. М.: Наука, 2010. 487 с.
5. *Темботова Ф.А., Пшегусов Р.Х., Тлупова Ю.М., Темботов Р.Х., Ахоматов А.З.* Состояние лесных экосистем горной Кабардино-Балкарии по данным дистанционного зондирования // *Известия РАН. Серия географическая*. 2012. № 6. С. 89–97.
6. *Тхазанлижева Л.Х., Шхагапсоев С.Х.* Состояние ценопопуляций и стратегия выживания *Lilium monadelphum* Vieb. в условиях стресса // *Экология*. 2010. № 2. С. 108–118.
7. *Шарая Л.С.* Предсказательное картирование лесных экосистем в геоэкологии // *Поволжский экологический журнал*. 2009. № 3. С. 249–257.
8. *Шарая Л.С.* Прогнозное картографирование лесных экосистем (ландшафтно-экологический подход) // *Изв. Самарского НЦ РАН*. 2013. Т. 15. № 3. С. 38–47.
9. *Шарая Л.С., Шарый П.А.* Связь абиотических и биотических характеристик лесной экосистемы Жигули // *Изв. Самарского НЦ РАН*. 2009. Т. 11. № 1. С. 22–30.
10. *Шарая Л.С., Шарый П.А.* Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии // *Экология*. 2011. № 1. С. 3–10.
11. *Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С.* Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // *Агрохимия*. 2011. № 2. С. 57–81.
12. *Шарый П.А., Смирнов Н.С.* Механизмы влияния солнечной радиации и анизотропии местности на растительность темнохвойных лесов Печоро-Ильчского заповедника // *Экология*. 2013. № 1. С. 11–19.
13. *Bartalev S.A., Belward A.S., Ershov D.V., Isaev A.S.* A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. N. 9. P. 1977–1982.
14. *Beckage B., Osborne B., Pucko C., Gavin D.G., Siccama T., Perkins T.* A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont // *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*. 2008. V. 105. P. 4197–4202.
15. *Fisher J.I., Mustard J.F., Vadeboncoeur M.A.* Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 100. P. 265–279.
16. *Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2005. V. 25. P. 1965–1978.
17. *Huete A., Justice C., van Leeuwen W.* MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical

- basis document. Version 3. Arizona: Univ. of Arizona and Virginia, April 1999. 120 p.
18. *Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H.* Vegetation responses to climate change in the Alps – Modeling studies // Cebon P., Dahinden U., Davies H., Imboden D., Jaeger C. (eds.) *A View from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change*. Boston: MIT Press. 1998. Chapter 6. P. 309–350.
 19. *Montgomery D.C., Peck E.A.* *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
 20. *Pike R.J., Evans I.S., Hengl T.* *Geomorphometry: A Brief Guide* // Hengl T., Reuter H.I. (eds). *Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science, V. 33*. Amsterdam: Elsevier, 2009. Chapter 1. P. 3–30.
 21. *Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S.* An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory. 2005. 143 p.
 22. *Schmidt G.A., Ruedy R., Hansen J.E., Aleinov I., Bell N., Bauer M., Bauer S., Cairns B., Canuto V., Cheng Y., Del Genio A., Faluvegi G., Friend A.D., Hall T.M., Hu Y., Kelley M., Kiang N.Y., Koch D., Lacis A.A., Lerner J., Lo K.K., Miller R.L., Nazarenko L., Oinas V., Perlwitz J.P., Perlwitz Ju., Rind D., Romanou A., Russell G.L., Sato Mki., Shindell D.T., Stone P.H., Sun S., Tausnev N., Thresher D., Yao M.-S.* Present day atmospheric simulations using GISS Model E: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data // *Journal of Climate*. 2006. V. 19. P. 153–192.
 23. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. P. 1–32.
 24. *Wood J.* Overview of software packages used in geomorphometry // T. Hengl, H.I. Reuter (eds.). *Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science, V. 33*. Amsterdam: Elsevier, 2009. Chapter 10. P. 257–267.

Change of NDVI in northern caucasus forest ecosystems as related to topography and climate

P. A. Shary, L. S. Sharaya

To analyze relationships between vegetation index NDVI and climate and topography in Kuban River basin, the 500 m grid of average July temperature, T_{jul} , was generated. The quality of the map, based on the grid, was reasoned by the close link ($R^2 = 0.978$) of the data from weather stations with topography. It was shown that the mean average temperature of July is controlled significantly not only by elevation above sea level, but also by slope insolation and by valley properties. Close non-linear links have been found between NDVI of mountain forests within the basin and T_{jul} . The samples of pine forests near the glaciers demonstrated close non-linear links between summer NDVI and topography, and distance from the glaciers. For broad-leaved, small-leaved and pine forest types in the basin, the ecological optima of T_{jul} is found, while it is not for dark coniferous forests. The forecast of NDVI for broad-leaved forests driven by E scenario in GISS climate model until 2050 shows that NDVI might diminish due to the temperature optimum shift towards greater elevations, where topography is characterized by negative conditions for the forests growth.

Geomorphometry, climate and topography effects on forest NDVI, ecological optimum, nonlinear relationship, North Caucasus.