ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2012, № 4, с. 45–61

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583 + 581.524.3 + 581.586

ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ЛАНДШАФТНУЮ СТРУКТУРУ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

© 2012 г. Э.Г. Коломыц, Л.С. Шарая

Институт экологии Волжского бассейна РАН

Поступила в редакцию 22.06.2010 г.

На примере Большого Кавказа излагается региональная прогнозно-экологическая концепция применительно к горным странам. Концепция основана на эмпирико-статистическом моделировании геосистем и новых методах геоморфометрии. По известному климатическому сценарию грядущего глобального потепления представлена аналитическая прогнозная модель преобразований горных ландшафтов на середину и конец XXI в. Излагаются также методы картографического прогнозного моделирования, построена прогнозная ландшафтная карта на северный макросклон хребта.

Введение. Среди глобальных экологических проблем современности важное место занимает прогноз экологических последствий предстоящего (и уже, по существу, начавшегося) глобального потепления климата, которое обусловлено техногенным ростом содержания углекислого газа, метана и других парниковых газов в атмосфере. Климатические прогнозы, основанные на этих геохимических сценариях, предполагают повышение средней глобальной температуры поверхности Земли в пределах 1.4–5.8° за период с 1990 по 2100 г., что в 2–10 раз больше величины потепления, произошедшем в XX в. [6]. Глобальные биосферные процессы зарождаются в конкретных регионах [11], поэтому *региональный подход к оценке глобальных изменений правомерно рассматривать как один из ведущих методологических аспектов географической экологии, призванной решать глобальные экологические проблемы.* Вместе с тем переход от глобального экологического прогноза к региональному встречает существенные методические трудности. Как известно, на региональном уровне процессы географической интеграции и дифференциации отличаются наибольшим разнообразием и дискретностью [17], поэтому региональный отклик на глобальные изменения климата имеет вид многозначной реакции растительности, почв и в целом ландшафтов на фоновые гидротермические сигналы.

Первый отечественный опыт регионального прогнозного моделирования природных экосистем с составлением растровых карт, пожалуй, впервые был представлен в работе [14]. На основе принципа актуализма авторы рассчитали характеристики растительного покрова южной части Приморского края по задаваемым (прогнозируемым) величинам климатических параметров. Однако в каждом из таких сценариев аппроксимация носила строго детерминированный характер и не учитывала разнообразия состояний субрегиональных и локальных геосистем при одних и тех же фоновых климатических условиях, что особенно характерно для горных территорий. Географический прогноз всегда более достоверен и практически значим, если он обладает определенной стохастичностью, многовариантностью [16], т.е. имеет вероятностный характер.

Такой вероятностный ландшафтно-экологический прогноз был впервые осуществлен нами около 30 лет назад на примере северного макросклона Большого Кавказа (СМБК) [7]. Эмпирико-статистические прогнозные расчеты и картографирование ландшафтов будущего основывались на климатической модели Будыко [2] , которая использовала известные палеогеографические сценарии. Несколько позже в Швейцарских Альпах, а также в горах Скандинавии и Северной Америки были начаты прогнозно-геоботанические исследования с построением гораздо более схематичных имитационных моделей [21, 22, 24 и др.].

В настоящем сообщении излагается новый, несравненно более совершенный вариант регионального прогноза на ту же территорию Большого

Кавказа. По одной из последних глобальных климатических моделей получен ландшафтно-экологический сценарий, основанный на качественно новых алгоритмах аналитических и картографических расчетов, которые были разработаны авторами в последние годы [8, 10, 19 и др.].

Методы аналитического прогнозирования. Стратегия прогноза исходит из принципа актуализма. Она состоит в первоначальной идентификации ландшафтных единиц СМБК (табл. 1) с определенными значениям базовых климатических условий и в последующей оценке наиболее вероятных преобразований этих объектов в соответствии с ожидаемыми изменениями климата. При этом предполагается многозначный характер трансформации геосистем при одном и том же значении гидротермического тренда, когда новое состояние будет иметь черты не одного, а нескольких состояний, существующих на начальный момент времени.

Следует подчеркнуть, что *приоритетным объектом ландшафтно-экологического прогнозирования является функциональная релаксация как первоочередная реакция геосистем на внешнее воздействие*. В экологических оценках предстоящего глобального потепления на ближайшие десятилетия речь может идти в первую очередь о функциональном, а не о структурно-морфологическом прогнозе [8, 10].

Вероятностный экологический прогноз ведется путем операций с современными и предполагаемыми гидротермическими нишами гео(эко-) систем. Для этого каждая такая ниша представляется как “размытое” (дескриптивное) множество состояний экосистемы в виде вектора-строки (или вектора-столбца). Составляющими вектора служат нормированные частные коэффициенты связи (C_{ij}, см. ниже).

Выдвигаемый нами принцип ландшафтно-экологического прогнозирования гласит: климатически обусловленное функциональное преобразование одного природного комплекса в другой тем значительнее, чем меньше была степень пересечения их климатических ниш в начальном состоянии, т.е. чем сильнее выражена исходная контрастность их состояний и чем больше окажется величина пересечения ниш после сближения геосистем по данному гидротермическому признаку. Трансформация, скажем, объекта A в объект B должна быть тем больше, чем дальше отстояли друг от друга эти объекты в многомерном экологическом пространстве и чем ближе они окажутся в результате сдвига объекта A по его координатам (климатическая ниша объекта B в данном случае принимается неизменной). Здесь объект A является редуцентом, а объект B – абсорбентом. В свою очередь, объект B (равно как и объект A) может частично трансформироваться в объект C, с соответствующим смещением природных границ и т. д. В итоге вырисовывается общая картина геосистемных преобразований в регионе.

Экологические ниши явлений – выделенных ландшафтных групп (см. табл. 1) в множестве климатических факторов определялись с помощью бинарной ординации каждого явления по фактору. С этой целью по всем состояниям x_i явления X, с их априорными $p(x_i)$ и условными $p(x_i/y_j)$ вероятностями, вычислялись частные коэффициенты связи $C(x_i/y_j)$:

$$C(x_i/y_j) = \frac{p(x_i/y_j)}{p(x_i)}. \qquad (1)$$

Матрица этих коэффициентов описывает систему климатических ниш ландшафтов в пространстве изменений данного гидротермического параметра. В векторе выделялась значимая область (+, •), где $C(x_i/y_j) > 1$. В дальнейшем производилось нормирование позиций каждого вектора экологических ниш явления, с получением удельных частот C_{ij} ($\sum C_{ij} = 1$). Градации фактора с максимальными значениями C_{ij} образуют некоторую оптимальную область явления, его экологический доминант (+), остальные же градации относятся к “размытой” части ниши (•).

По каждой паре объектов A и B рассчитывались две прогнозные характеристики: $P_{ii} \equiv K(A_0 \to A_1)$ – переход объекта A в самого себя (вероятность его устойчивости) и $P_{ij} \equiv K(A_0 \to B_0)$ – вероятность поглощения его другим объектом B (здесь “≡” – знак тождества). Эти характеристики выражались следующими мерами включения (“∩”):

$$K(A_0 \to A_1) = \frac{A_0 \cap A_1}{A_0}, \qquad (2)$$

$$K(A_0 \to A_1) = \frac{A_1 \cap B_0 - A_0 \cap B_0}{A_0}. \qquad (3)$$

В работах [8, 10] приведены расчетные формулы, а также подробно изложены алгоритмы самих прогнозных расчетов. С помощью последних находились: общая вероятность P_i преобразований ландшафта-редуцента, суммарные M_i и парциальные m_{ij} скорости его переходов во все j-е ландшафты-абсорбенты, а также время $T(P_{ii})$ полной трансформации редуцента, выражаемое в числах шагов или в годах. Расчетные формулы указанных характеристик имеют вид, согласно [18]:

$$P_i = (1 - P_{ii}); \qquad M_i = (1 - P_{ij})/d;$$
$$m_{ij} = P_{ij}/P_i; \qquad T(P_{ii}) = 1 / M_i,$$

Таблица 1. Ландшафты северного макросклона Большого Кавказа (Центрального и частично Западного), по классификации [1]

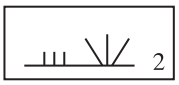
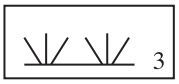
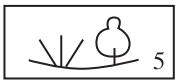
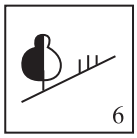
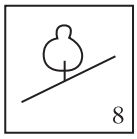
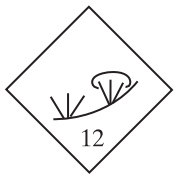
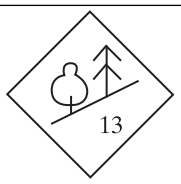
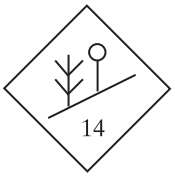
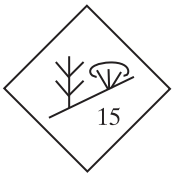
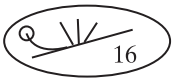
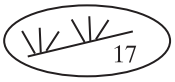
Тип ландшафтов	Подтип ландшафтов	Ландшафтные группы (ЛГ)	
		Порядковый номер и наименование	Символ
Равнинные теплоумеренные семигумидные	Лугостепные, луговые и кустарниковые	1. Равнинно-холмистые, с лугостепями и кустарниками	
Равнинные теплоумеренные и умеренные семиаридные	Степные	2. Равнинно-холмистые, с разнотравно- и полынно-злаковыми степями	
		3. Равнинно-холмистые межгорные, с разнотравно-злаковыми лугостепями	
		4. Предгорно- и равнинно-холмистые, со степями, лугостепями и шибляком	**Номер 4**
Равнинные субгидроморфные	Болотистые, солончаковые, луговые	5. Низменные аккумулятивные и пойменные, с лугами и лесами, реже с солонцами и солончаками	
Горные умеренные гумидные	Нижне- и среднегорно-лесные Нижнегорно-лесные	**6.** Среднегорные, с дубовыми и грабово-буковыми лесами и послелесными лугами	
	Среднегорно-лесные	**7.** Нижнегорные, с дубовыми и грабово-буковыми лесами и лугами	
		8. Среднегорные карстовые с буковыми лесами	
		9. Нижнегорные карстовые, с грабово-буковыми лесами, послелесными лугами и кустарниками	
Горные умеренные семигумидные	Горно-котловинные лесные и степные Низко- и среднегорные лесные, луговые и степные	10. Горно-котловинные, с дубовыми лесами, степями, шибляком, фриганой и редколесьем	
		11. Низко- и среднегорные, со степями, кустарниками, лугостепями, реже с буковыми и грабово-дубовыми лесами	
Горные умеренные семиаридные	Горно-котловинные степные	12. Горно-котловинные, с горно-степной, шибляковой и фригановой растительностью	

Таблица 1 (продолжение)

Тип ландшафтов	Подтип ландшафтов	Ландшафтные группы (ЛГ)	
		Порядковый номер и наименование	Символ
Горные холодно-умеренные, семигумидные и семиаридные	Верхнегорные лесные сосновые и березовые	13. Среднегорные, с буково-темнохвойными лесами	
		14. Верхнегорные э-д и палеогляциальные, с сосновыми и березовыми лесами	
		15. Верхнегорные, с сосновыми, реже березовыми лесами	
Высокогорные холодные луговые	Высокогорные субальпийские лесо-кустарниково-луговые	16. Высокогорные, с лугами, кустарниками и редколесьями	
	Высокогорные альпийские кустарниково-луговые	17. Высокогорные, с альпийскими лугами в комплексе с «декиани»	
	Высокогорные субнивальные	18. Высокогорные субнивальные	
Гляциально-нивальные		19. Ледники, высокогорные пустыни	

где d – число шагов. В данном случае имеем два шага: 1990–2050 гг. и 2050–2100 гг. (как известно [6], начало современного глобального потепления приходится на середину–конец 80-х годов XX в.).

Региональный климатический прогноз и его геоморфометрическая детализация. Региональный сценарий антропогенных изменений климата в текущем столетии взят из новейшей глобальной прогнозно-климатической модели GISS Model E, входящей в семейство моделей общей циркуляции атмосферы [25]. Модель достаточно хорошо имитировала реальные изменения климата за период 1880–2003 гг., особенно за последние 30–40 лет. Она дает повышение глобальной температуры на 2.7–2.9 °С при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере, что соответствует эмпирическому диапазону чувствительности климата, установленному по палеогеографическим данным [23].

На первом этапе рассчитывались матрицы базовых климатических параметров (средних температур января и июля, сумм осадков холодного и теплого периода) по данным гидрометсети СМБК. С этой целью был проведен статистический анализ связей климатических параметров с абсолютной высотой и 17-ю характеристиками горного рельефа – морфометрическими величинами МВ (табл. 2, см. также [19]). Исходная матрица рельефа получена из спутниковых данных NASA по Кавказскому

Таблица 2. Статистические связи базовых и прогнозируемых климатических параметров Большого Кавказа с горным рельефом

Климатические параметры		Уравнение множественной линейной регрессии	r_S	P
Средняя температура	января	$X = [-73.5 \cdot Z + 14.5 \cdot GA + 12.0 \cdot F(35°,180°)] \cdot 0.249 - 2.8$	0.72	$<10^{-6}$
	июля	$X = (-87.3 \cdot Z + 7.9 \cdot H - 4.8 \cdot kv) \cdot 0.277 + 23.6$	0.96	$<10^{-6}$
Количество осадков холодного периода (по регионам)	западный	$X = [-45 \cdot F(35°,140°) + 27.8 \cdot GA - 27.2 \cdot Z] \cdot 12.704 + 569.2$	0.57	$<10^{-3}$
	центральный	$X = [70.4 \cdot Z + 26.7 \cdot MCA + 2.9 \cdot F(35°,325°)] \cdot 8.236 - 85.4$	0.77	$<10^{-6}$
	восточный	$X = (-53.5 \cdot kv - 39.4 \cdot MCA - 7.1 \cdot M) \cdot 9.591 + 655.2$	0.76	$<10^{-4}$
Количество осадков теплого периода (по регионам)	западный	$X = (-60.3 \cdot kh + 32.8 \cdot GA + 6.9 \cdot MCA) \cdot 9.761 + 904.8$	0.49	$<10^{-2}$
	центральный	$X = (79.7 \cdot Z - 10.6 \cdot kh + 9.7 \cdot MCA) \cdot 5.553 + 461.3$	0.75	$<10^{-6}$
	восточный	$X = [-41.1 \cdot F(35°,270°) + 34.1 \cdot Z - 24.8 \cdot MCA] \cdot 8.299 + 675.9$	0.70	$<10^{-4}$
Изменение средней температуры к 2050 г.	января	$X = (-36.0 \cdot MCA - 35.1 \cdot Z - 28.9 \cdot t_{янв}) \cdot 0.011 + 1.7$	0.62	$<10^{-4}$
	июля	$X = (-49.6 \cdot t_{июля} - 48.6 \cdot Z + 1.8 \cdot k_{max}) \cdot 0.408 + 20.8$	0.60	$<10^{-3}$
Изменение количества осадков к 2050 г.	холодного периода	$X = (-55.2 \cdot r_{хп} - 43.2 \cdot H + 1.6 \cdot Z) \cdot 0.704 + 24.2$	0.56	$<10^{-3}$
	теплого периода	$X = (59.4 \cdot H - 37.0 \cdot kv - 3.6 \cdot r_{тп}) \cdot 0.648 + 19.8$	0.56	$<10^{-3}$

Примечание. Средние температуры: $t_{янв}$ – января, $t_{июля}$ – июля. Суммы осадков: $r_{хп}$ – холодного периода, $r_{тп}$ – теплого периода. Z – абс. высота. MCA – площадь водосбора; GA – крутизна склона. Кривизна: H – средняя; k_{max} – максимальная; kv – вертикальная; kh – горизонтальная. $F(35°,145°)$ – освещенность склонов (в скобках указаны углы склонения Солнца и азимут). Коэффициенты регрессии перед морфометрическими величинами выражены в %, соответствующих их относительному вкладу в пространственную изменчивость климатического параметра. Статистические характеристики: r_S – ранговый коэффициент корреляции Спирмана; P – уровень значимости.

региону SRTM30 с разрешением 30 дуговых минут. Затем она была преобразована в равнопромежуточную проекцию Каврайского для европейской части России с шагом решетки 500 м. Определение статистических связей, расчет матриц базовых климатических показателей и формирование детальных климатических карт проведено с помощью программы “Аналитическая ГИС Эко” [20].

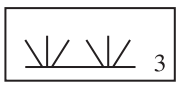
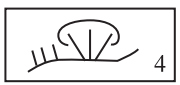
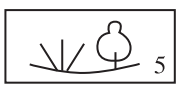
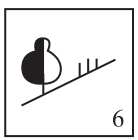
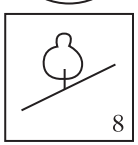
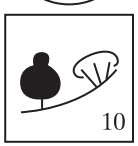
На втором этапе рассчитывались матрицы изменения климатических показателей для двух прогнозных сроков – 2050 и 2100 гг. Предварительно данные по модели E GISS были трансформированы с помощью триангуляции Делоне на решетку размером 1°×1°. Далее проводилась интерполяция параметров на основе выявленных статистических связей их с рельефом Большого Кавказа, а также базовых показателей климата.

В уравнениях регрессии, характеризующих статистические связи климата и горного рельефа Большого Кавказа (см. табл. 2), три первых члена – ведущие предикторы пространственной изменчивости климата, выраженные через независимые МВ. Средние температуры января ($t_{янв}$) и июля ($t_{июля}$) весьма тесно связаны с характеристиками рельефа ($P < 10^{-6}$, $r_S = 0.96$ и 0.72). Пространственные изменения $t_{янв}$ и $t_{июля}$ определяются абсолютной высотой соответственно на 74% и 87%. У среднеянварской температуры прослеживается также зависимость от крутизны склонов (на 15%) и освещенности склонов с юга (на 12%). Температура же июля дополнительно связана со средней выпуклостью форм рельефа (на 8%) и с вогнутостью профиля склонов (на 5%). Прогнозируемые изменения среднеянварской температуры определяются тремя предикторами: площадью водосбора, абсолютной высотой и базовой температурой. С двумя последними факторами связано и изменение средней температуры июля.

Пример сравнения результатов прогнозного климатического картирования по модели NASA и по нашей модели представлен на рис. 1. Очевидно, что пространственная структура полученной нами модели несоизмеримо сложнее и гораздо контрастнее. Она различается высоким уровнем значимости ($P < 10^{-4}$ для 2050 г. и $P < 10^{-3}$ для 2100 г.).

Ожидаемые изменения температуры января в среднем для ландшафтных групп СМБК положительны: в пределах 0.9°–1.4° на середину XXI в. и 1.0°–1.7° к 2100 г. Эти цифры достигают нижнего предела (1.5°) общего глобального потепления, прогнозируемого по сценарию удвоения концентрации CO_2 в атмосфере [4]. Средняя температура июля повысится несколько меньше – на 0.8°–1.0°. Количество осадков в холодную половину года будет варьировать незначительно. Не намного существеннее изменятся и осадки теплого периода. К 2050 г. они уменьшатся в среднем на 9–16 мм,

Таблица 3. Характеристики вероятностей и скоростей функционально-структурных переходов для ландшафтных групп северного макросклона Большого Кавказа на прогнозные сроки 2050 и 2100 гг. согласно климатической модели E GISS.

Высотные ярусы	Ландшафтные группы	2050 г.						2100 г.					
		Pii	*Pi*	*Mi*	m_{ii}(ср)	τ (ш)	τ (г)	*Pii*	*Pi*	*Mi*	m_{ii}(ср)	τ (ш)	τ (г)
Предгорный	1	0.782	0.218	0.218	0.054	4.58	274.7	0.550	0.45	0.225	0.112	4.45	489.0
	2	0.550	0.45	0.45	0.114	2.22	133.3	0.904	0.096	0.048	0.17	20.86	2295.2
	 3	0.593	0.407	0.407	0.034	2.46	147.4	0.328	0.672	0.336	0.224	2.98	327.3
	 4	0.459	0.541	0.541	0.27	1.85	110.8	0.719	0.281	0.14	0.281	7.13	784.1
	 5	0.647	0.353	0.353	0.038	2.84	170.2	0.922	0.078	0.039	0.028	25.73	2830.2
Нижне- и средне-горный	 6	0.464	0.536	0.536	0.077	1.86	111.9	0.503	0.497	0.249	0.071	4.02	442.6
	7	0.590	0.41	0.41	0.068	2.44	146.4	0.387	0.613	0.307	0.102	3.26	358.7
	 8	0.500	0.500	0.50	0.062	2.64	158.4	0.569	0.431	0.216	0.054	4.64	510.2
	9	0.526	0.474	0.474	0.052	2.11	126.6	0.751	0.249	0.125	0.062	8.02	882.2
	 10	0.528	0.472	0.472	0.053	2.12	127.2	0.488	0.512	0.256	0.064	3.91	430.0

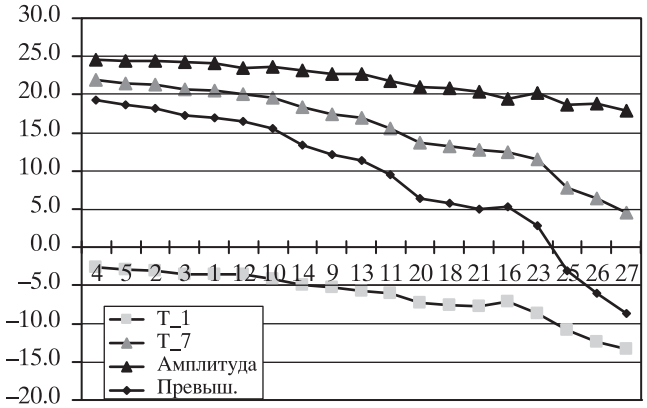
Верх-негорный	11	0.440	0.56	0.56	0.052	1.78	107.1	0.698	0.302	0.151	0.061	6.62	728.3
	12	0.628	0.372	0.372	0.048	2.69	161.2	0.453	0.547	0.273	0.068	3.66	402.4
	13	0.594	0.406	0.406	0.05	2.46	147.9	0.396	0.604	0.302	0.087	3.31	364.0
	14	0.574	0.426	0.426	0.07	2.34	140.7	0.433	0.567	0.284	0.08	3.52	387.8
	15	0.409	0.591	0.591	0.061	1.69	101.5	0.456	0.544	0.272	0.076	3.67	404.1
Высоко-горный	16	0.557	0.443	0.443	0.034	2.26	135.4	0.549	0.451	0.225	0.041	4.44	488.1
	17	0.754	0.246	0.246	0.049	4.06	243.5	0.720	0.28	0.14	0.047	7.15	786.0
	18	0.968	0.032	0.032	0.016	31.39	1883.2	0.741	0.259	0.13	0.018	7.72	849.0
	19	0.887	0.113	0.113	0.023	8.82	528.9	0.912	0.088	0.044	0.027	22.71	2498.4

Таблица 3 (продолжение)

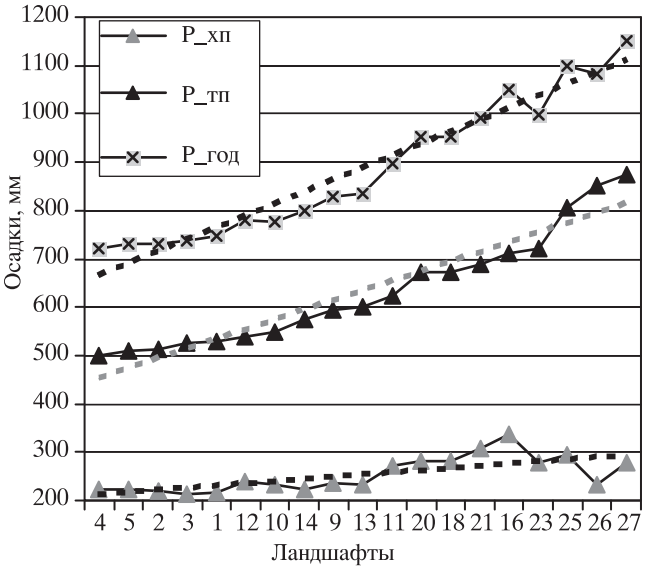
Порядок ландшафтов по значениям средней высоты их расположения.

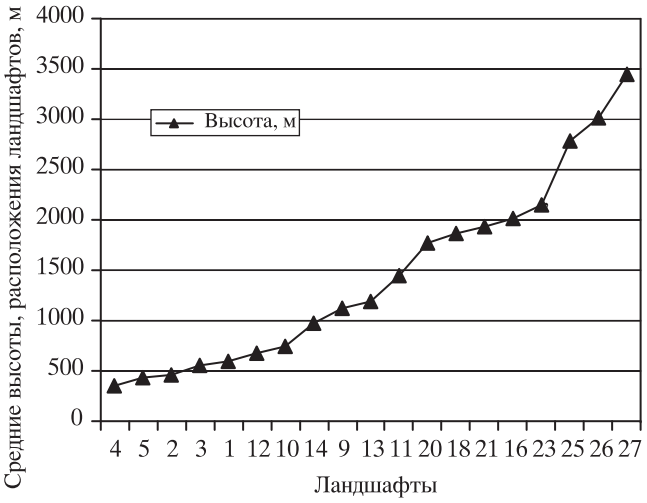
Порядок исходный		Порядок по высоте	
ландшафты	высота. м	ландшафты	высота. м
1	600	4	354
2	465	5	428
3	558	2	465
4	354	3	558
5	428	1	600
9	1122	12	682
10	747	10	747
11	1452	14	972
12	682	9	1122
13	1193	13	1193
14	972	11	1452
16	2014	20	1777
18	1863	18	1863
20	1777	21	1937
21	1937	16	2014
23	2149	23	2149
25	2785	25	2785
26	3008	26	3008
27	3443	27	3443

Связь ландшафтов, расположенных по высотам с базовыми климатическими параметрами – температурами января и июля.
(Амплитуда – значение, равное сумме модулей T_1 ($t_{янв.}$) и T_7 ($t_{июля}$) = диапазону изменения температур. Превышение – значение, равное разнице модулей $t_{янв.}$ и $t_{июля}$ = = показывает, насколько $t_{июля}$ превышает $t_{янв.}$ или наоборот).



Связь ландшафтов, расположенных по высотам с базовыми климатическими параметрами – осадками холодного и теплого периодов.



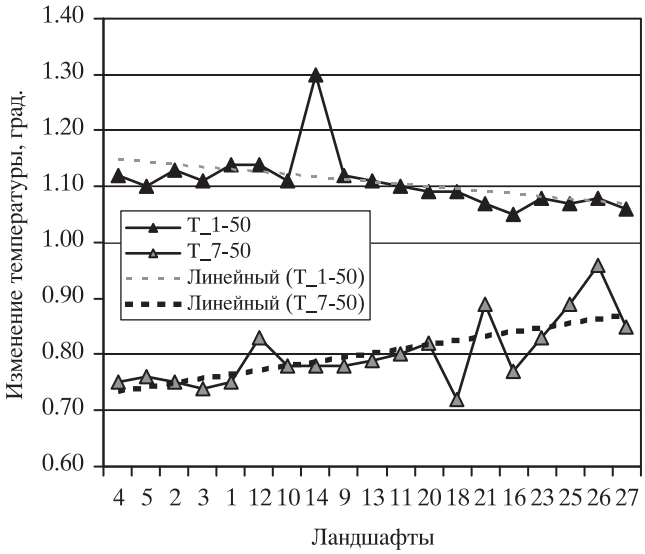


а в конце столетия – на 20–28 мм (максимально на 30–40 мм). Таким образом, климатическая модель E GISS дает небольшое снижение атмосферного увлажнения и прогнозирует развитие в регионе Большого Кавказа *термоаридного тренда, который должен быть выражен вполне отчетливо в течение всего года*.

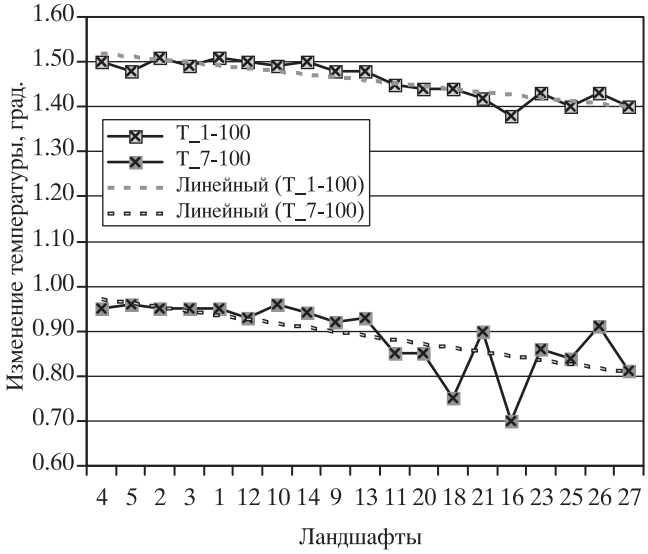
Аналитическая прогнозная модель. В результатах аналитического этапа прогнозного моделирования (рис. 2, табл. 3) прежде всего следует отметить множественность переходов почти каждой ландшафтной группы (ЛГ) не только в соседние по высотному ярусу горные ландшафты, но и в весьма удаленные природные комплексы – вплоть до равнинно-холмистых предгорий. При этом неизбежны и соответствующие смены гидротермических состояний ландшафтов: от холодных до теплоумеренных и от гумидных до се-

Таблица 3 (продолжение)

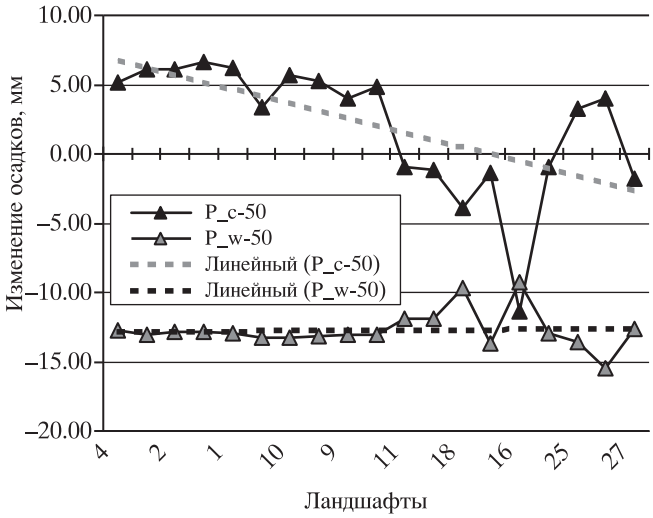
Изменениями температур к 2050 г.



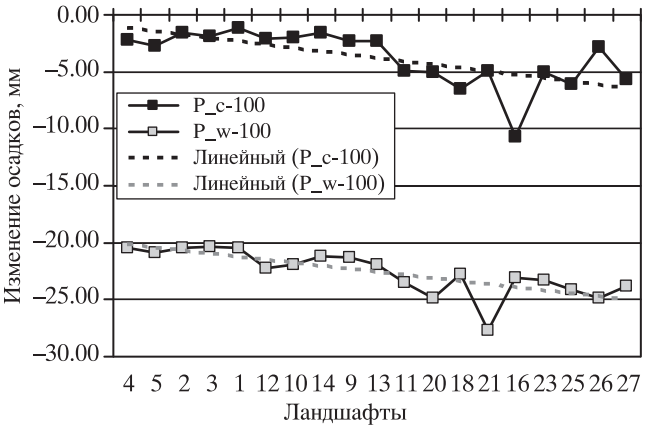
Изменениями температур к 2100 г.



Изменениями осадков к 2050 г.



Изменениями осадков к 2100 г.



миаридных. Такая сложная система ожидаемых ландшафтных преобразований объясняется тем, что каждая ЛГ объединяет региональные природные комплексы, находящиеся в различных геоморфологических условиях: на гребнях хребтов и плоских водоразделах, на склонах различной циркуляционной и солярной экспозиции, в межгорных долинах и котловинах. В соответствии с этим при одном и том же климатическом сигнале в каждой ландшафтной группе возникает целый спектр функционально-структурных переходов, с довольно низкими значениями доминирующих переходных вероятностей ($P_{ij} \leq 0.20$).

В целом ландшафты СМБК не отличаются сколько-нибудь значительной устойчивостью даже при том слабом климатическом воздействии, что дает модель E GISS. Параметр P_{ii} колеблется от 0.41–0.55 до 0.63–0.75, и это говорит о высокой в целом чувствительности горных ландшафтов к изменениям климата. При этом возникает определенное множество вариантов будущего облика ландшафтов в пределах каждой группы, поэтому средняя парциальная скорость ландшафтных преобразований m_{ij}(ср) в большинстве случаев весьма низка (см. табл. 3).

Ландшафты с минимальной устойчивостью ($P_{ii} \leq 0.50$) встречаются во всех высотных ярусах, за исключением высокогорного. Это предгорные степи и лугостепи (ландшафтная группа 4), нижне- и среднегорные дубовые и грабово-буковые леса и развитые на их месте лугостепи и кустарники

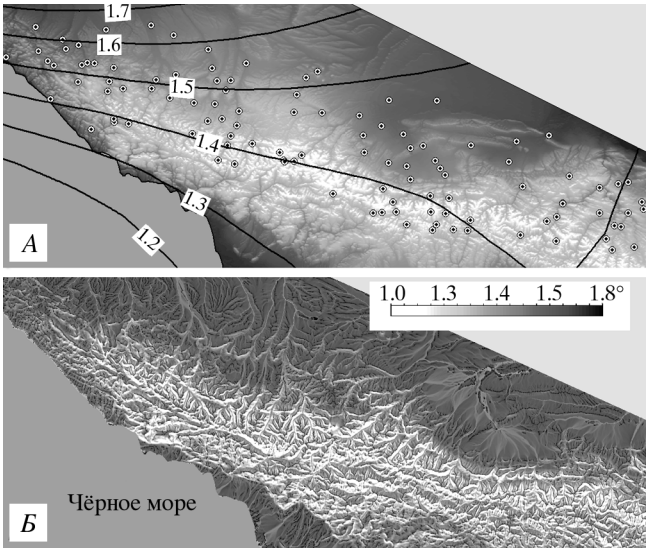


Рис. 1. Изменения средней температуры января на Большом Кавказе к 2050 г.
а – карта рельефа, с изолиниями изменений температуры, построенными по данным NASA (модель E GISS); пунсонами обозначены местоположения метеостанций; *б* – матрица изменений температуры, рассчитанная с учетом горного рельефа.

(группы 6, 8 и 11), наконец, верхнегорные сосняки и березняки (ЛГ 15). Сравнительно высокую устойчивость ($P_{ii} \geq 0.59$) имеют нижне- и верхнегорные широколиственные и смешанные леса (ЛГ 7 и ЛГ 13), а также горно-котловинные семиаридные степи (ЛГ 12). Наиболее высокая устойчивость ($P_{ij} \geq$ 0.85–0.90) свойственна ландшафтам субнивального и нивально-гляциального поясов.

На первом интервале (1990–2050 гг.) скорости ландшафтных переходов в большинстве случаев будут значительно выше, чем на втором (2050–2100 гг.). По-видимому, во второй половине XXI в. произойдет замедление функционально-структурных преобразований ландшафтов, особенно в предгорьях и низкогорьях. Для обоих прогнозных сроков характерна общая тенденция: по мере подъема в горы интенсивность ландшафтных переходов ослабевает (параметр m_{ij} снижается с 0.20–0.26 до 0.04–0.08), с одновременным разреживанием самой сети переходов.

На орграфе (см. рис. 2) стрелки переходов направлены главным образом вниз по СМБК. Это

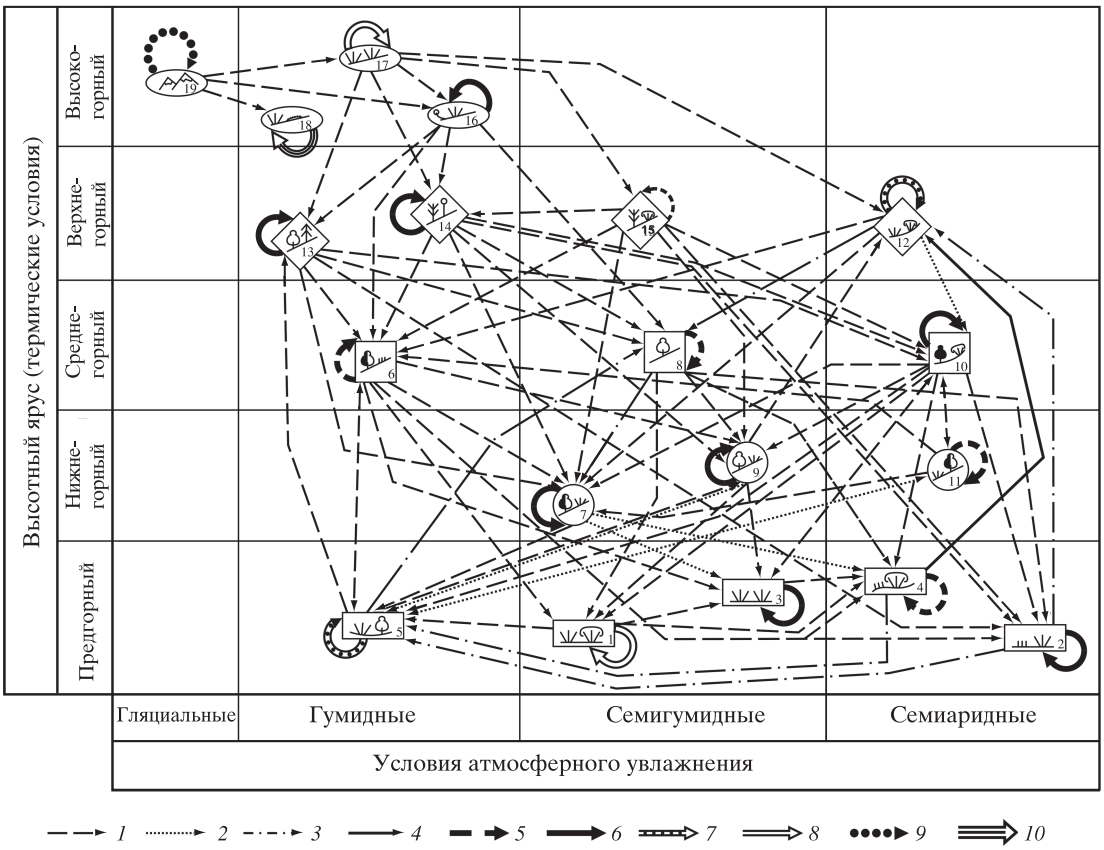


Рис. 2. Северный макросклон Большого Кавказа. Орграфы функциональных ландшафтно-экологических переходов на срок 2050 г., согласно прогнозно-климатической модели E GISS, между ландшафтными группами (см. табл. 1), находящимися в различных высотных ярусах и неодинаковых условиях атмосферного увлажнения.
Вероятности стабилизации P_{ii} и взаимных переходов P_{ij}: 1 – 0.01–0.10; 2 – 0.11–0.20; 3 – 0.21–0.30; 4 – 0.31–0.40; 5 – 0.41–0.50; 6 – 0.51–0.60; 7 – 0.61–0.70; 8 – 0.71–0.80; 9 – 0.81–0.90; 10 – 0.91–1.00.

означает, что преобразования ландшафтов в каждом высотном ярусе будут идти преимущественно в сторону геосистем нижележащих ярусов, более теплых и менее увлажненных, что соответствует общему термоаридному климатическому тренду. Соответственно вверх по склонам станут смещаться и ландшафтные границы.

Согласно экологическому правилу оптимальности [15], при глобальном потеплении «давление» внешнего (адвективного) климатического фактора должно ослабевать. Соответственно будут обостряться мезо- и микромасштабные контрасты гидротермических полей за счет повышения роли субрегиональных и локальных факторов. Должны усилиться солярно-экспозиционные и высотно-поясные различия в геофизических режимах ландшафтов. В итоге следует ожидать повышения разнообразия и контрастности природно-территориальной структуры горной страны. Это важное для прогноза следствие из правила оптимальности подтверждается также ландшафтно-геохимическими данными [3].

В высокогорном ярусе наиболее существенную трансформацию претерпят альпийские луга (ЛГ 17), частично переходя на склонах хребтов в состояние верхнегорных березово-сосновых лесов (ЛГ 15; P_{ij} = 0.22, m_{ij} = 0,056), а в межгорных понижениях – в горно-котловинные семиаридные кустарниковые степи (ЛГ 12; P_{ij} = 0.17, m_{ij} = 0.043). Сюда будут трансгрессировать также субальпийские луга и редколесья (ЛГ 16, m_{ij} = = 0.047). Сами же сообщества субальп начнут переходить в соседние верхнегорные экосистемы: в гумидные буково-темнохвойные леса на Западном Кавказе (ЛГ 13; m_{ij} = 0.054) и в семиаридные березово-сосновые леса восточнее Эльбруса (ЛГ 14; m_{ij} = 0.071). Возможна также их трансформация в среднегорные буковые леса (ЛГ 8; m_{ij} = = 0.047). В сумме это составит около 40% общей трансформации субальпийских экосистем.

В верхнегорный ярус (ЛГ 13, 14 и 15) начнут распространяться как среднегорные леса, так и лесо-лугово-степные комплексы межгорных котловин (ЛГ 6, 8 и 10; m_{ij} = 0.065–0.100). В бассейне Кубани темнохвойные древостои будут вытесняться буками и грабами, и ландшафты здесь приобретут облик гумидных лесных среднегорий (ЛГ 6 и 8). На Центральном Кавказе начнется настоящее остепнение верхнегорных лесов – вплоть до состояния предгорных разнотравно- и полынно-злаковых степей (ЛГ 2; m_{ij} = 0.049–0.043).

В среднегорьях широколиственные леса (ЛГ 6) будут трансформироваться почти на 30% в свои нижнегорные аналоги (ЛГ 7 и 9; m_{ij} = 0.073–0.078), а послелесные луга даже приобретут облик предгорных лугостепей (ЛГ1). Наконец, процессы олуговения и остепнения охватят весь нижнегорный ярус. Преобразование его гумидных дубовых и грабово-буковых лесов пойдет сразу по нескольким направлениям, с конечным превращением их в разнотравно-злаковые лугостепи и степи (ЛГ 1 и 3).

Ландшафтно-экологический прогноз в картографическом выражении. Региональное прогнозное картографирование проводилось также путем операций с климатическими нишами ландшафтов. При этом рассматривались только термические ниши как наиболее значимые. При построении прогнозной карты использованы изложенные в работе [19] методы геоморфометрической статистики и соответствующие частные геоморфометрические карты. Построение прогнозных карт основано на бинарной ординации параметра C_{ij} как редуцентов, так и абсорбентов по двум климатическим факторам: $t_{янв}$ и $t_{июля}$.

Климатически обусловленная трансформация природных комплексов на карте выражается определенным смещением ландшафтных границ. При этом следует говорить главным образом о фитоценотических сдвигах как наиболее реальных. Вектор этого смещения на карте задается ориентированным графом перехода одной ландшафтной группы в другую (см. рис. 2). Гораздо сложнее было определить величину территориального смещения фитоценотической и соответственно ландшафтной границы, а следовательно, оценить степень площадной трансформации одной ЛГ в другую. Эта задача решалась путем перебора всех бинарных отношений ландшафтных групп, представленных на орграфе. Каждый раз рассматривалась динамическая пара объектов: поглощаемого *A* и поглощающего *B*. Принято, что *процесс поглощения может идти по отношению не только к смежному объекту, но и к достаточно удаленному* (к соседям, второго, третьего и т.д. порядка). В общем случае он имеет характер *очаговой трансформации геосистем*, которая является ведущей формой их климатогенных преобразований [8]. Набор абсорбентов для каждого редуцента определялся по значимым вероятностям P_{ij} ландшафтно-экологических переходов на данный прогнозный срок, начиная с наибольшей величины P_{ij}.

В первую очередь брался такой объект *B*, абсорбирующие свойства которого по отношению к объекту *A* выражены в наибольшей степени и по которому климатическая ординация всей совокупности ЛГ оказывается достаточно «размы-

той». При слишком жесткой связи этот фактор может создать непреодолимо высокий барьер для перехода $A \rightarrow B$. Поскольку вероятность перехода $P_{ij}(A \rightarrow B) \ll 1$, то правомерно полагать, что процесс преобразований объекта A всегда будет носить локализованный характер. Иными словами, переход $A \rightarrow B$ должен совершаться по частям, начиная с тех фрагментов a_i ареала A, которые наиболее предрасположены к такому преобразованию, исходя из базовых климатических условий. Как определить такие фрагменты?

Как уже говорилось, проекция экологической ниши данной ЛГ на поле $t_{янв}$ или $t_{июля}$ слагается из доминанта ниши и ее периферийных частей. Проведенный нами ранее анализ механизмов формирования ландшафтно-зональных систем и их границ показал [9], что на периферии природных комплексов резко возрастает системоформирующее и пространственно дифференцирующее влияние транзитных факторов, в том числе гидротермических. Следовательно, наиболее чувствительными к климатическим сигналам должны быть те ландшафты, которые оказались в позициях “размытой” части ниши. Такие фрагменты a_i ареала A будут наименее устойчивыми и начнут трансформироваться в первую очередь.

В приведенном примере (табл. 4) в качестве редуцента рассматривается субальпийская ЛГ 16. На прогнозный срок 2050 г. первоочередными фрагментами этих ландшафтов, которые в условиях глобального потепления начнут терять свой прежний субальпийский облик, будут те, которые окажутся в диапазонах $t_{янв} = -5.2 \div (-9.0)^o$ и $t_{июля} = 13.5 \div 16.0^o$.

Необходимо найти также группу ландшафтов, выступающую в роли абсорбента, а также определить относительную площадь, поглощаемую им у того или иного редуцента. Принято, что для каждого фрагмента a_i редуцированного ареала A абсорбентом будет та адекватная ему ЛГ, экологический доминант которой находится в том же (или близком) температурном диапазоне, что и поглощаемый фрагмент. Поиск абсорбента велся путем сопоставления векторов климатических ниш редуцента с нишами всех возможных абсорбентов. В данном случае (см. табл. 4) по $t_{янв}$ это были два абсорбента: 1) ЛГ 13 – для субальпийских ландшафтов, оказавшихся в диапазоне $-7.0 \div (-9.0)^o$; 2) ЛГ 14 – для ландшафтов, попавших в диапазон $-5.2 \div (-7.0)^o$. Выявлялся также преобладающий абсорбент и по $t_{июля}$; им оказалась среднегорная лугово-лесная ЛГ 8.

Сама же поглощаемая площадь оценивалась по значению соответствующего C_{ij} при допущении, что к данному прогнозному сроку происходит полное поглощение абсорбентом рассматриваемого редуцированного фрагмента. Например, исходя из данных табл. 4, принимаем, что к 2050 г. в переходах по средней температуре января ЛГ 16 → ЛГ 14 и ЛГ 16 → ЛГ 13 субальпийские ландшафты будут сокращать свою площадь соответственно на 12 и 24%. По $t_{июля}$ субальпы на 15% своей площади перейдут в состояние среднегорных буковых лесов (ЛГ 8).

Таблица 4. Матрицы нормированных частных коэффициентов связи субальпийских лесо-кустарниково-луговых ландшафтов (ЛГ 16 – редуцента), а также верхнегорных лесных и среднегорных лесолуговых природных комплексов (ЛГ 13, 14, 8 и 6 – абсорбентов) со среднеянварской и среднеиюльской температуройв 2050 г., согласно прогнозно-климатической модели E GISS

Средняя температура января	Ландшафтные группы		
	16	13	14
–15.0 ÷ (–12.5)	0.06		
–12.5 ÷ (–10.5)	0.23 •		0.03
–10.5 ÷ (–9.0)	0.29 +	0.30 •	0.24 •
–9.0 ÷ (–7.0)	0.24 •	0.36 +	0.30 +
–7.0 ÷ (–5.2)	0.12 •	0.27 •	0.34 +
–5.2 ÷ (–4.0)	0.05	0.07	0.08
–4.0 ÷ (–3.0)	0.01		0.02

Средняя температура июля	Ландшафтные группы		
	16	8	6
0 ÷ 3.5	0.06		
3.5 ÷ 6.5	0.05	0.04	
6.5 ÷ 9.0	0.13 •	0.09	
9.0 ÷ 11.0	0.24 •	0.10 •	
11.0 ÷ 13.5	0.32 +	0.32 +	0.01
13.5 ÷ 16.0	0.15 •	0.35 +	0.16 •
16.0 ÷ 18.7	0.04	0.08	0.62 +
18.7 ÷ 21.0			0.21 •

Примечание. Позиции экологической ниши: + – экологический доминант (оптимум ниши); • – «размытая» часть ниши. Расшифровку обозначений ландшафтных групп см. в табл. 1.

В дальнейшем проводилось совмещение частных климатических карт с картой ландшафтной (рис. 3). На последней отыскивались все фрагменты a_i объекта A, адекватные по своему состоянию объекту B, которые теперь становились частью ареалов абсорбента, либо входили в его типологическое множество. Переходя к следующему объекту-абсорбенту C, т.е. анализируя бинарное отношение $A \rightarrow C$, использовали ординацию объекта A по тому климатическому фактору, который еще не рассматривался. Описанная операция проводилась по всем значимым ландшафтно-экологическим переходам объекта A в объекты B, C, D и т.д. в порядке уменьшения параметра P_{ij}. При выборе направлений поглощения в случае множественности равновероятных переходов предпочтение отдавалось ближайшему абсорбенту – соседу первого порядка.

По изложенному алгоритму была построена прогнозная ландшафтно-экологическая карта СМБК на срок 2050 г. (рис. 4). Обобщенные представления об изменениях ландшафтной мозаики региона дает табл. 5. Для ее построения были использованы базовые площади ландшафтных групп и суммарные поглощаемые доли этих площадей. Как видно, в целом по региону размах приращений площадей (+ΔS) у ландшафтных групп довольно велик – от 5–10% до 1.5-кратного. Сокращение же площадей (–ΔS) лежит в более узком диапазоне – от 20–25 до 55–60%.

К середине XXI в. в Предкавказье значительно (на 20–30%) расширятся площади семиаридных степей (ЛГ 4), а также лесо-луговых комплексов речных долин. В то же время сократят свои ареалы разнотравно-полынно-злаковые степи (ЛГ 2). Площади низкогорных лугостепей с грабо-буковыми лесами (ЛГ 11) также уменьшатся – за счет расширения соседних дубняков (ЛГ 7). В среднегорном ярусе широколиственные леса (ЛГ 6 и 8) практически останутся в своих первоначальных ареалах. Существенно расширятся площади верхнегорных сосняков и березняков в сторону субальп по бассейну Кубани (ЛГ 14, $+\Delta S \approx \approx 0.71 \div 3.22$). В то же время многочисленные ареалы верхнегорных сосняков (ЛГ 15), разбросанные по Центральному Кавказу, более чем на 20% сократят свои площади, замещаясь как березняками соседней ЛГ 14, так и трансгрессирующими сюда снизу среднегорными буковыми лесами (ЛГ 8).

Активное и почти повсеместное смещение вверх по склонам хребтов верхнегорных лесов приведет к значительному сокращению площадей субальпийской и даже альпийской растительности – соответственно на 40% и 20%. Только субнивальный пояс значительно (от 85 до 180%) увеличит свои ареалы, активно наступая на высокогорные пустыни и отступающие ледники и гораздо меньше замещаясь альпийским поясом.

В целом по Большому Кавказу максимальной динамичностью должны отличаться верхнегорные ландшафты, как лесные, так и луговостепные. Термоаридный тренд наиболее резко проявится, с одной стороны, в средне- и верхнегорных остепненных котловинах, а с другой, – на контакте субнивального пояса с поясом высокогорных пустынь и ледников.

Заключение. Следует признать определенную ограниченность прогнозно-экологических моделей, основанных на методе актуализма. Это касается не только эмпирико-статистических, но также имитационных методов моделирования. Прогноз может оказаться реальным только на период сохранения равновесных или, по крайней мере, стационарных процессов с присущей им эргодичностью [13]. Надежность моделей существенно снизится, если в течение прогнозного периода системообразующая роль экологических факторов будет кардинально меняться. В этом случае прогнозируемая система, будучи изначально линейной, перейдет в категорию нелинейных систем, отличительная черта которых непропорциональность их отклика на возмущающий сигнал [5].

Можно, однако, полагать, что для наших моделей эти ограничения в значительной мере “снимаются”, поскольку модели описывают траекторию преобразования геосистемы как серию последовательных смен (этапов) ее функциональных состояний. Если принять в первом приближении релаксацию системы на каждом этапе этой серии процессам равновесным или стационарным неравновесным, согласно [12], то сам процесс приобретает свойства обратимости, что позволяет предсказывать поведение системы на основе базовых вероятностных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беручашвили Н.Л., Арутюнов С.Р., Тедиашвили А.Г.* Ландшафтная карта Кавказа. М-б 1: 1 000 000. Тбилиси: Изд-во Тбилис. ун-та, 1979 (на 2-х листах).
2. *Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. Тбилиси: Изд-во Тбилис. ун-та, 1980. 351 с.
3. *Глазовская М.А.* Техногенез и проблемы ландшафтно-геохимического районирования // Вестник МГУ. Сер. V. География. 1968. № 1. С. 30–36.

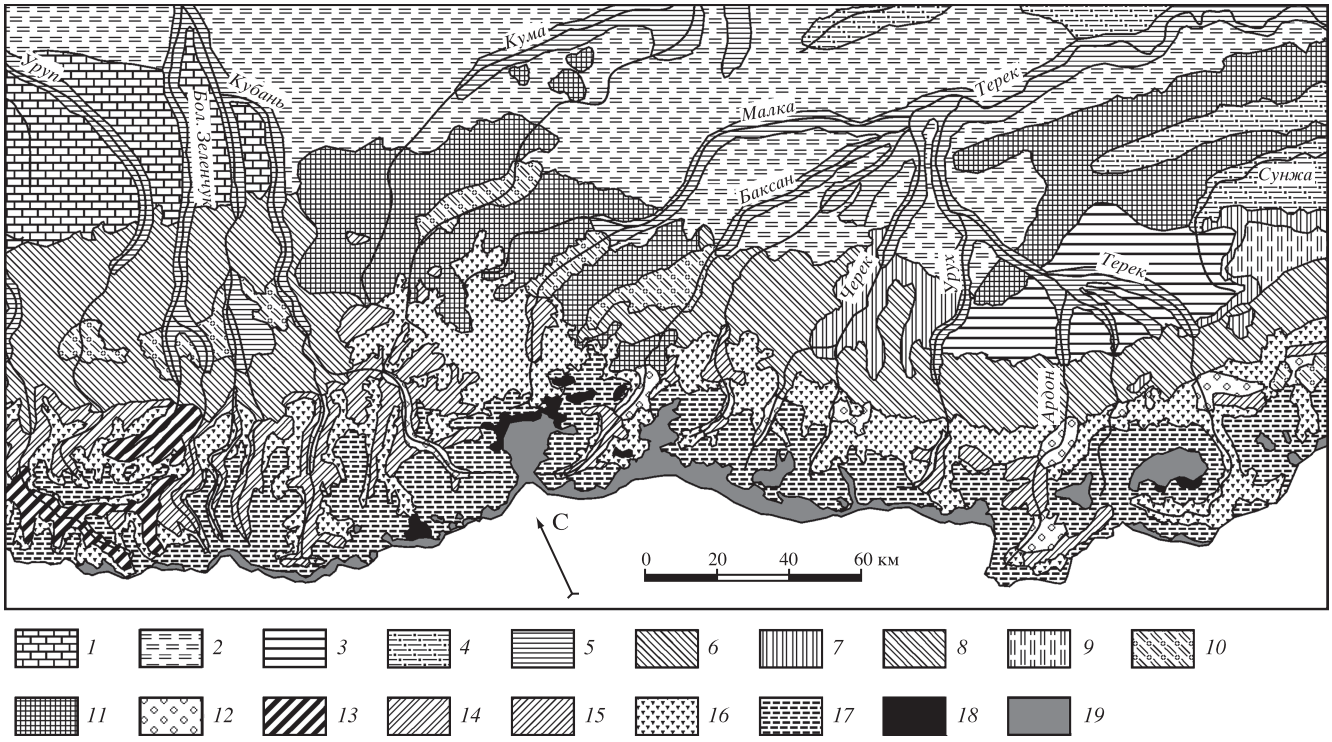


Рис. 3. Фрагмент ландшафтной карты северного макросклона Большого Кавказа, по Н.Л. Беручашвили и др. [1]. *1–19* – ландшафтные группы (см. табл. 1).

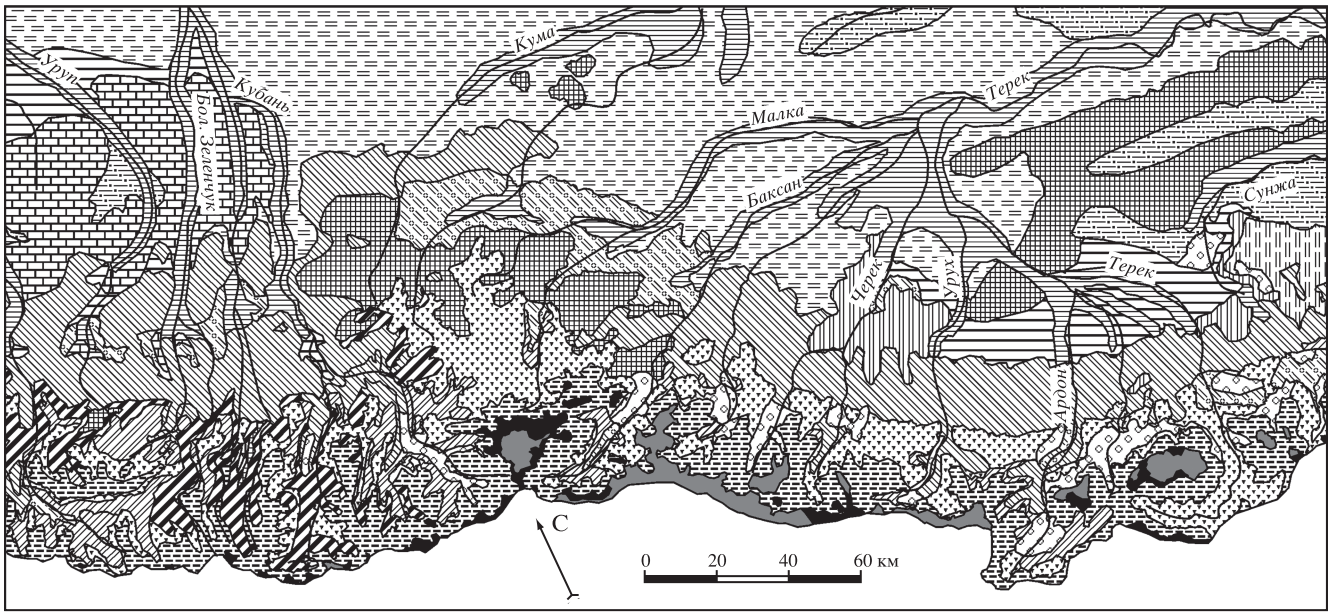


Рис. 4. Карта ландшафтно-экологических условий северного макросклона Большого Кавказа, прогнозируемых на 2050 г., согласно глобальной климатической модели E GISS.
Условные обозначения ландшафтных групп те же, что и на рис. 3.

Таблица 5. Северный макросклон Большого Кавказа. Относительные изменения площадей ландшафтных групп в результате их взаимных переходов на прогнозной срок 2050 г. согласно прогнозно-климатической модели E GISS

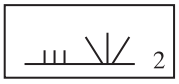
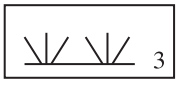
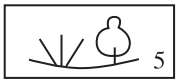
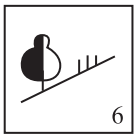
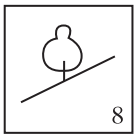
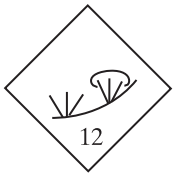
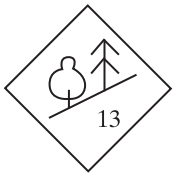
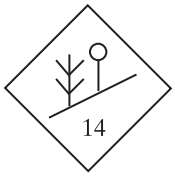
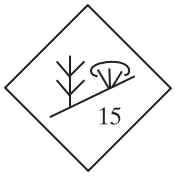
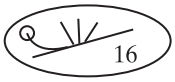
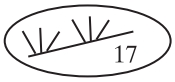
Высотные ярусы	Ландшафтные группы	Изменение площади, ΔS		
		приращение + ΔS	потеря – ΔS	результат ∑ ΔS *
Пред-горный	1	0.24	0.19	+ 0.05 (– 0.01)
	 2	0.05	0.39	– 0.34 (+ 0.02)
	 3	0.49	0.58	– 0.09 (+ 0.21)
	4	0.59	0.29	+ 0.30 (+ 0.21)
	 5	0.52	0.33	+ 0.19 (+ 0.12)
Низко-горный	7	0.74	0.54	+ 0.20 (– 0.16)
	9	0.81	0.52	+ 0.29 (+ 0.48)
	11	0.11	0.38	– 0.27 (– 0.21)
Среднегорный	 6	0.25	0.28	– 0.03 (+ 0.09)
	 8	0.40	0.30	+ 0.10 (+ 0.14)
	10	1.54	0.45	+ 1.09 (+ 0.54)
Верхне-горный	 12	8.30	0.36	+ 7.94 (+ 0.69)

Таблица 5 (продолжение)

Высотные ярусы	Ландшафтные группы	Изменение площади, ΔS		
		приращение + ΔS	потеря – ΔS	результат ∑ ΔS *
	 13	0.52	0.34	+ 0.18 (0)
	 14	3.48	0.26	+ 3.22 (+ 0.71)
	 15	0.39	0.60	– 0.21 (– 0.32)
Высоко-горный	 16	0.16	0.55	– 0.39 (– 0.16)
	 17	0.09	0.30	– 0.21 (– 0.22)
	18	1.49	0.63	+ 0.86 (+1.79)
	19	0	0.43	– 0.43 (– 0.42)

* В скобках указаны значения ∑ ΔS, полученные в процессе суперпозиции карт средних январских и июльских температур с ландшафтной картой.

4. Глобальное потепление. Докл. ГРИНПИС / Под ред. Дж. Легетта. М.: Изд-во МГУ, 1993. 272 с.
5. *Зейдис И.М., Кружалин В.И., Симонов Ю.Г.* и др. Общие свойства динамики геосистем // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2001. № 4. С. 3–8.
6. Изменение климата, 2001 г. Обобщенный доклад МГЭИК / Д. Л. Албриттон, Т. Баркер, И. Башмаков и др. / Под ред. Р.Т. Уотсона. Geneva: World Meteorological Organization, 2003. 220 p.
7. *Коломыц Э.Г.* Прогноз влияния глобальных изменений климата на ландшафтную структуру горной страны // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1983. № 1. С. 14–30.
8. *Коломыц Э.Г.* Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
9. *Коломыц Э.Г.* Бореальный экотон и географическая зональность. Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
10. *Коломыц Э.Г.* Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
11. *Колосов В.А., Сдасюк Г.В.* Глобально-региональные взаимозависимости // Глобальные изменения и региональные взаимосвязи. М.: Ин-т географии АН СССР, 1992. С. 7–32.
12. *Пузаченко Ю.Г.* Профилактика экологических катастроф // Новые концепции в географии и прогнозирование. М.: Наука, 1993. С. 21–34.
13. *Пузаченко Ю.Г.* Методологические основы географического прогноза и охраны среды. М.: Изд-во УРАО, 1998. 212 с.
14. *Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С.* Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.
15. *Розен Р.* Принцип оптимальности в биологии. М.: Мир, 1969. 216 с.

16. *Саушкин Ю.Г.* Географичекская наука в прошлом, настоящем и будущем. М.: Просвещение, 1980. 269 с.

17. *Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.

18. *Харбух Дж., Бонэм-Картер Г.* Моделирование на ЭВМ в геологии. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 319 с.

19. *Шарая Л.С.* Предсказательное картирование лесных экосистем в геоэкологии // Поволжский экологич. журнал. 2009. № 3. С. 249 –257.

20. *Шарый П.А.* Аналитическая ГИС Эко // Сайт: http/ www.giseco.info. 2001.

21. *Bugman H.* A simulified forest model to study species composition along climatic gradients // Ecology. 1996. V. 77. № 7. P. 2055–2074.

22. *Guisan A., Theurillat J.– P., and Spichiger R.* Effect of climate change on alpen plant diversity and distribution // Potential ecol. impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains/ Geneva: Consrevatoire et Jardin Botaniques, 1995. P. 129–135.

23. *Kienast F.* Simulated effects of increasing atmospheric CO_2 and changing climate on Alpine forest ecosystems // Landscape ecology. 1991. V. 5. № 4. P. 225–238.

24. *Hansen J., Sato M., Ruedy R.,* et al. Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E // Climate Dynamics. 2007 a. V. 29. P. 661–696.

25. *Schmidt, G.A., Ruedy R., Hansen J.E.* et al. Present day atmospheric simulations using GISS Model E: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data // J. Climate. 2006. V. 19. P. 153–192.

The Effect of Global Warming on the Landscape Structure of North Caucasus

E. G. Kolomyts, L. S. Sharaya

Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences

The concept of regional ecological prediction is presented with regard to mountainous countries. The concept is based on the empirical-statistical modeling of ecosystems and the new methods of geomorphometry. The analytical prediction model of transformations of mountainous landscapes for the middle and the end of the 21st century is based on the given climate change scenario of forthcoming global warming. The methods of cartographic predictive modeling are presents. A predictive landscape map has been created for northern slope of the mountain range.