

Э.Г. КОЛОМЫЦ

Институт экологии Волжского бассейна РАН,
445003, Тольятти, ул. Комзина, 10, Россия, egk2000@mail.ru**КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛЖСКОГО БАСЕЙНА)**

Осуществлено прогнозное картографическое моделирование направления и скорости преобразования ландшафтно-зональной структуры региона по одному из сценариев глобальных изменений климата. Излагается методика прогнозных аналитических расчетов по алгоритму операций с климатическими нишами гео(эко)систем. Выполнено региональное картографирование очаговой и индукционной фитоценологической трансформации ландшафтов различных природных зон по термогумидному варианту регионального потепления. Показано, что зональная составляющая климатогенной трансформации геосистем представляет собой первоочередной объект регионального ландшафтно-экологического прогнозирования. На прогнозных картах доминирующей по своей роли очаговой трансформации ландшафтов показаны две динамические характеристики: 1) преобладающая тенденция перехода данного вида ландшафтов из «своей» природной зоны (подзоны) в другое зональное подразделение; 2) общая степень межзональных фитоценологических преобразований ландшафтов данного вида. Второстепенная индукционная трансформация ландшафтов, связанная с их трансграничным взаимодействием и определяющая степень сдвига ландшафтных границ, реально проявляется только для ландшафтных соседств первого порядка. Дана количественная оценка влияния «родовых барьеров», характеризующих морфогенетические контрасты природно-территориальной мозаики, на систему ландшафтно-зональных переходов. Приведены фрагменты прогнозных карт очаговой и индукционной трансформации видов ландшафтов Волжского бассейна. Описаны фитоценологические преобразования ландшафтов на прогнозные сроки 2050, 2075 и 2100 гг. В западном секторе бассейна прогнозируется массовая трансгрессия бореальной растительности в подзону широколиственных лесов и даже в среднюю лесостепь. В восточном, предуральском секторе, напротив, ожидается внедрение широколиственно-лесных и лесостепных сообществ в бореальную зону.

Ключевые слова: природные зоны, классификация ландшафтов, глобальное потепление, аналитическое прогнозное моделирование, прогнозные картографирование, прогнозные ландшафтно-экологические сценарии.

E.G. KOLOMYTS

Institute of Ecology of Volga Basin, Russian Academy of Sciences,
445003, Tolyatti, ul. Komzina, 10, Russia, egk2000@mail.ru**CARTOGRAPHIC MODELS OF REGIONAL LANDSCAPE-ECOLOGICAL FORECASTING
(A CASE STUDY OF THE VOLGA BASIN)**

A forecasting cartographic modeling of the direction and rate of transformation of the region's landscape-zonal structure has been carried out according to one of the scenarios of global climate change. The methodology of predictive analytical calculations as an algorithm for operations with climatic niches of geo (eco-) systems is described. Regional mapping of focal and induction phytocenological transformation of landscapes of various natural zones was performed by using the thermo-humid variant of regional warming. It is shown that the zonal component of the climatic transformation of geosystems is the primary object of regional landscape-ecological forecasting. On the forecast maps of the dominant focal transformation of landscapes, two dynamic characteristics are shown: 1) the prevailing tendency for a given type of landscape to move from its "own" natural zone (subzone) to another zonal subdivision, and 2) the general degree of interzonal phytocenological transformations of landscapes of a given species. The secondary induction transformation of landscapes, associated with their transboundary interaction and determining the degree of displacement of landscape boundaries, actually manifests itself only for landscape neighbors of the first order, with a corresponding shift of landscape boundaries. A quantitative assessment of the influence of "generic barriers" characterizing the morphogenetic contrasts of the natural-territorial mosaic pattern on the system of landscape-zonal transitions is given. Fragments of forecast maps of focal and induction transformation of landscapes in the Volga river basin are presented. The processes of phytocenotic transformations of the landscapes for the predicted periods of 2050, 2075 and 2100 are briefly described. In the western sector of the Volga basin, mass transgression of boreal vegetation into the subzone of deciduous forests

and even into the middle forest-steppe is predicted. In the eastern, pre-Ural sector, on the contrary, the introduction of broad-leaved and forest-steppe communities in the boreal zone is expected.

Keywords: *natural zones, classification of landscapes, global warming, analytical forecasting modeling, forecasting mapping, forecast landscape-ecological scenarios.*

ВВЕДЕНИЕ

Среди глобальных экологических проблем современности важное место занимает прогноз экологических последствий уже начавшегося глобального потепления климата, которое вызвано техногенным ростом содержания парниковых газов в атмосфере. Известно, что глобальные биосферные процессы зарождаются в конкретных регионах, поэтому региональный подход к их изучению становится наиболее эффективным путем выявления кризисных экологических ситуаций и поиска путей их ликвидации [1]. Однако переход от глобального биоклиматического прогноза к региональному связан с методическими трудностями, которые возникают ввиду многозначности реакции зонально-региональных типов гео(эко)систем и экзогенных процессов на одно и то же фоновое климатическое воздействие.

В настоящей статье излагается один из результатов научного поиска автора в области развиваемой им концепции регионального экологического прогнозирования [2, 3]: картографическом моделировании направления и скорости преобразований ландшафтно-зональной структуры региона с учетом ожидаемых (по данному географическому прогнозу) глобальных антропогенных изменений климата. Региональный ландшафтно-экологический прогноз, проведенный на примере бореального экотона Волжского бассейна по сценарию одной из глобальных климатических моделей, включает: установление механизмов климатогенных преобразований зональных типов региональных геосистем, индицируемых, согласно В.Н. Сукачеву [4], коренными растительными формациями; расчет и картографирование межзональных переходов геосистем и получение общей картины трансформации ландшафтной текстуры региона; оценку ограничивающей роли морфогенетических барьеров, обусловленных литогенной основой ландшафтов.

В процессах ландшафтно-зональных перестроек рассматриваются, главным образом, изменения в структуре фитобиотического блока ландшафтов как наиболее чувствительного к внешним воздействиям и наиболее динамичного. Такой подход в географическом прогнозировании вполне обоснован [5], однако он ограничен в силу усложнения экзогенной динамики фитоценозов их внутренними взаимоотношениями.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На карте зональное геопространство выражено его ландшафтной текстурой как формой территориального размещения и позиционной упорядоченности типологических ландшафтных единиц, согласно [5]. Ландшафтная карта основного водосбора Волжского бассейна, фрагмент которой представлен на рис. 1, составлена В.П. Юниной в м-бе 1:2 500 000 [2]. В основу легенды ландшафтной карты положена классификационная система [6], учитывающая основные закономерности формирования ландшафтов на региональном уровне. В качестве классификационных объединений наиболее высокого ранга приняты зональные группы. Сочетание зональных и секторных, связанных с континентальностью климата, критериев дает зонально-секторные типы и подтипы ландшафтов.

На нижних ступенях классификации определяющими критериями служат субрегиональные и локальные признаки литогенного фактора. По генезису, общим чертам рельефа и его возрасту выделяются роды ландшафтов, т. е. их генетические группы (эрозионно-денудационные, моренные, зандровые и т. д.). Литолого-механический состав почвообразующих пород и формы мезорельефа, а также почвенно-растительные признаки предопределили выделение видов ландшафтов. Закономерности размещения и позиционной упорядоченности этих единиц образуют ландшафтную текстуру данной природной зоны.

С целью экологического прогнозирования, связанного с изменениями климата, проведена «экологизация» ландшафтной карты для того, чтобы в облике основных операционных единиц (видов ландшафтов) более четко отразились зонально-региональные особенности фоновой биоклиматической системы [2]. Все виды ландшафтов Волжского бассейна (61 вид) были объединены в 20 типологических групп ландшафтов, согласно [7]. Это высокоранговые единства, идущие по иерархии за классами и подклассами ландшафтов и различающиеся по типам водного и геохимического режимов, степени

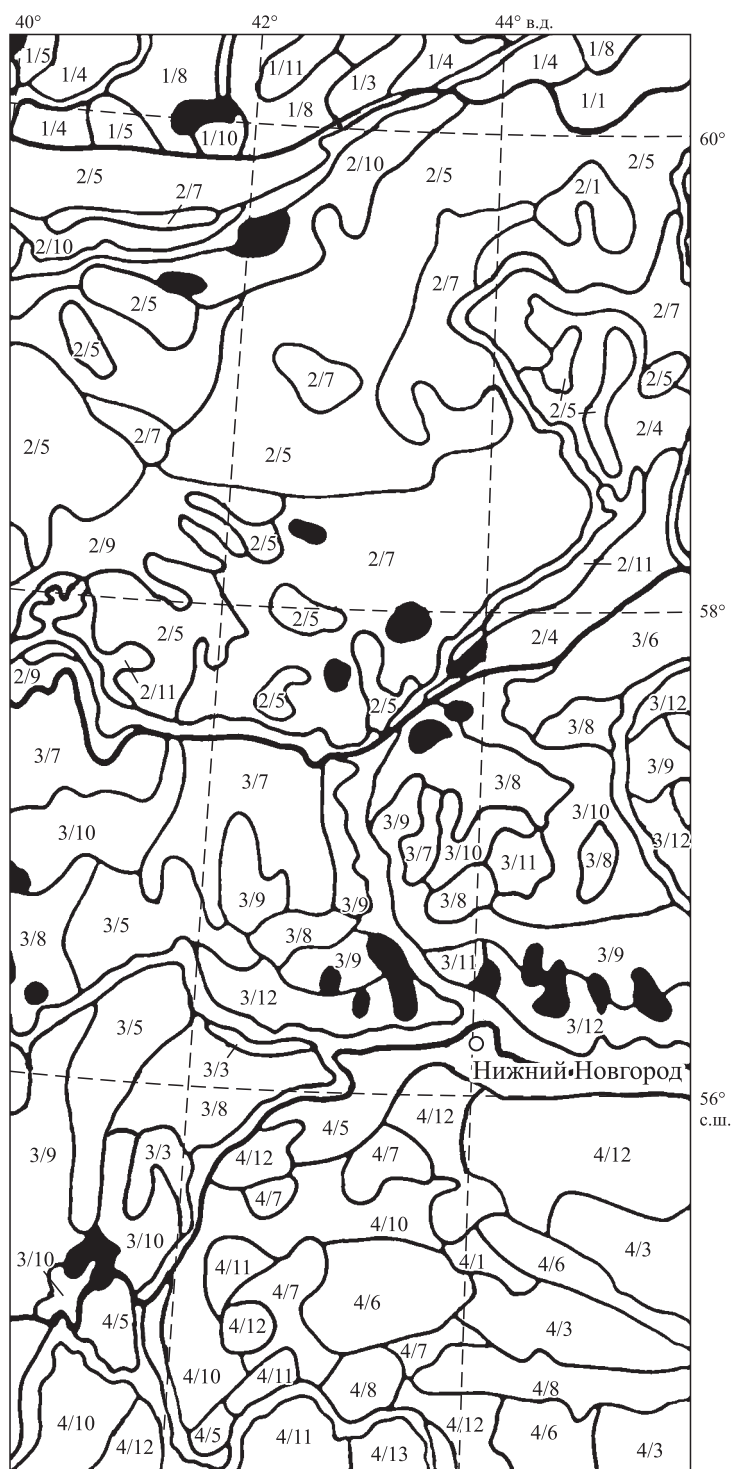


Рис. 1. Фрагмент ландшафтной карты основного водосбора Волжского бассейна.

I — обозначения видов ландшафтов; в числителе — номер зоны или подзоны (1 — средней тайги, 2 — южной тайги, 3 — подтайги, 4 — широколиственных лесов); в знаменателе — номер вида ландшафтов (расшифровку см. табл. 1). Ландшафты: II — речных долин, III — болотные. Границы: IV — природных зон и подзон, V — видов ландшафтов.

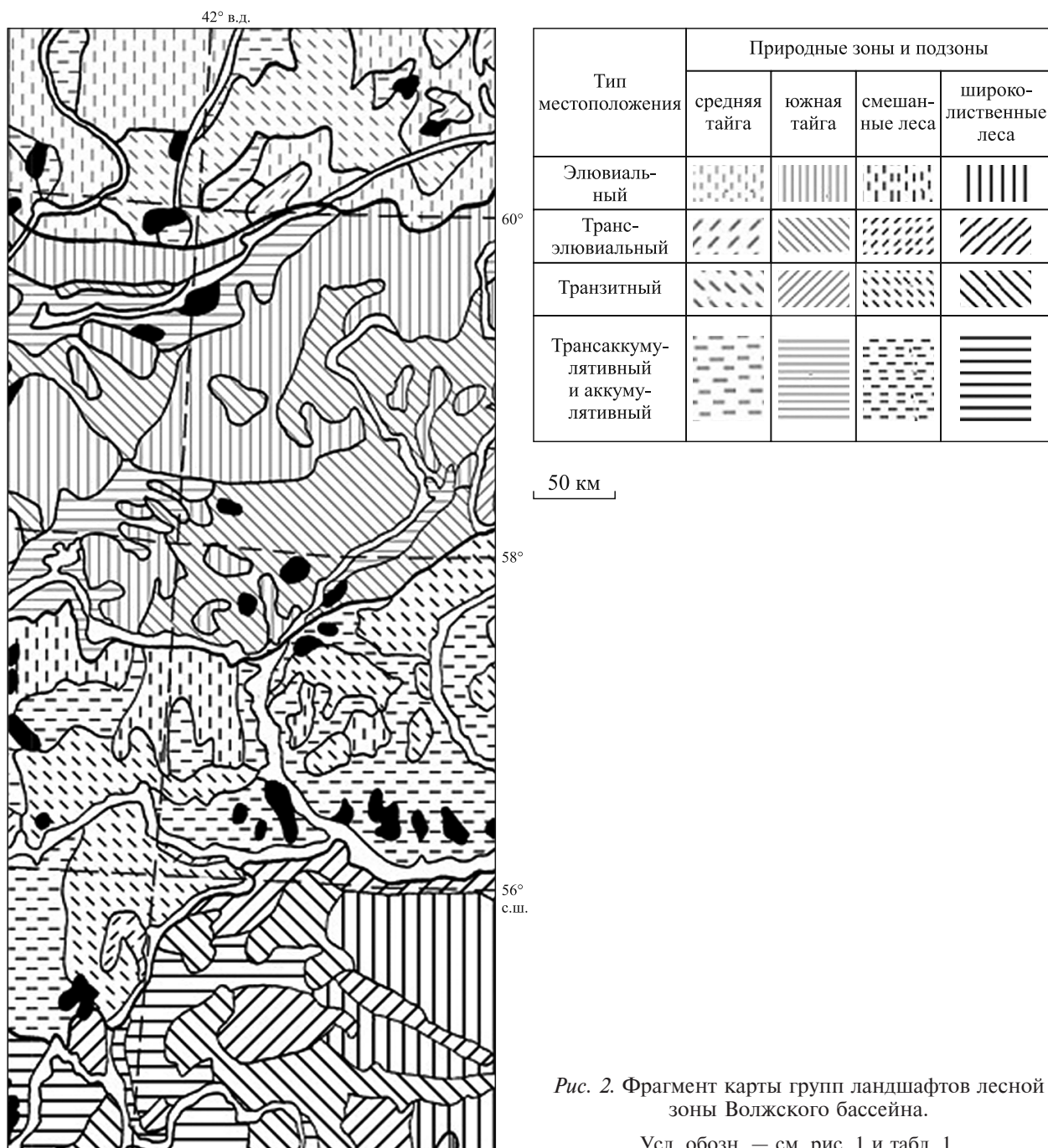


Рис. 2. Фрагмент карты групп ландшафтов лесной зоны Волжского бассейна.

Усл. обозн. — см. рис. 1 и табл. 1.

дренированности территории, а также морфолитодинамическими процессами (рис. 2). Для их выделения использованы два признака — зональная принадлежность и региональный тип местоположения [8]: элювиальный (Э), трансэлювиальный (ТЭ), транзитный (Т), трансаккумулятивный (ТА) и аккумулятивный (А). По таксономическому рангу группы ландшафтов соответствуют региональным единицам растительности — классам и группам формаций [4].

Виды и группы ландшафтов были также разнесены по степени литоморфности/гидроморфности как «прямодействующему» экологическому фактору, который связывает воедино ландшафтообразующий эффект зональных и а зональных факторов. Данный признак достаточно четко вписывается в систему координат родов и групп ландшафтов (см. табл. 1). В общем случае переход от возвышенно-

Таблица 1

Экологическая классификация ландшафтов основного водосбора Волжского бассейна и его окружения

Роды ландшафтов (субстрат)	Группы ландшафтов (типы местоположений)				
	ТЭ	Э	Т	ТА	А
Эрозионно-денудационный, Э-Д (суглинки)	2/2 (с/л) 3/2 (л) 4/4 (л) 5/2 (л) 6/1, 6/2 (л)	2/1 (с/л) 3/1 (с/л) 4/1 – 4/3 (л)			
Эрозионный, Э (суглинки)	3/3 (л)	4/5, 4/6 (л)	5/4 (л)		
Моренный, М (суглинки, супеси)		2/5 (г/л) 3/7 (г/л)			
Денудационно-зандровый, Д-З (суглинки-пески)			2/3, 2/4 (г/л) 3/4 – 3/6 (г/л) 4/7, 4/8 (с/л)		
Моренно-зандровый, М-З (пески-суглинки)		2/6 (с/г)	3/8 (с/г) 4/9 (г/л)		
Озерно-аллювиальный, ОЗ-АЛ (суглинки)			3/11 (г) 4/12, 4/13 (с/л) 5/3 (с/л)	6/4 (г/л)	2/9 (г)
Зандровый, З (пески, супеси)				2/7, 2/8 (с/г) 3/9, 3/10 (с/г) 4/10, 4/11 (г-л)	
Долинно-зандровый, Д/З (пески, супеси)					2/10 (г) 3/12 (г) 4/14 (с/г)

Примечание. 2/1, 2/2, 3/1 и т. д. — обозначения видов ландшафтов (см. легенду к ландшафтной карте, рис. 1, а). В скобках — обозначения свойств почвогрунтов: г — гидроморфные, с/г — субгидроморфные, г-л — гидролитоморфные, с/л — сублитоморфные, л — литоморфные.

равнинных местоположений к низменно-долинным сопровождается ухудшением дренажа и соответствующей активизацией процессов гидроморфизма при ослаблении роли фактора литоморфности, что вызывает смену доминантов растительного покрова. Также вполне однозначно дифференцируются роды ландшафтов (ЭД, Э, М и т. д.) по их экологическим группам (ТЭ, Э, Т и т. д.), образуя парогенетический ряд (по терминологии [9]), с определенным набором видов ландшафтов. Так, эрозионно-денудационные ландшафты распространены преимущественно на ТЭ мезоместоположениях, а задровые — исключительно на ТА (см. табл. 1).

В качестве ожидаемого воздействия климатической системы использованы трансформированные на региональный уровень (с шагом 1° широты и долготы) прогнозные сценарии глобальных антропогенных изменений климата на период до 2100–2200 гг., согласно неравновесной прогнозной модели GISS [10] и ее более поздней версии EGISS [11]. По результатам оценок статистической значимости результатов она признана одной из наиболее предпочтительных моделей общей циркуляции атмосферы AOGCMs [12] и успешно применялась в прогнозно-экологических исследованиях. Ее последняя версия достаточно реалистично отобразила столетнюю климатическую динамику в пределах Европейского континента [11]. По этим моделям нами проведены расчеты и картографирование ландшафтно-геофизических условий Волжского бассейна на прогнозные сроки 2050, 2075 и 2100 гг., в которые ожидается повышение глобальной температуры, соответственно, на 0,8–1, 2–2,2 и 3–4 °C [2, 3].

ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общий процесс фитоценологических преобразований в природных комплексах условно делится на две группы. К первой из них относятся трансграничные взаимодействия фитоценозов, принадлежащих различным ландшафтным ареалам в условиях соседств первого, второго и т. д. порядков.

Это, по существу, явление фитоценотической индукции, или наведения, обусловленное, в первую очередь, разносом семян и их выживаемостью [13] на данном этапе экзогенетических сукцессий [4]. Такой процесс фронтальных фитоценотических преобразований можно назвать индукционным.

Вторую группу образуют процессы очаговой, или площадной, трансформации фитоценозов, когда решающую роль в смене доминантов играет наличие уже готового банка семян в почве или существование (в других жизненных формах или хотя бы в угнетенном состоянии) определенных биогрупп, способных при благоприятных условиях занять доминирующее положение в фитоценозе [4, 14]. Этот процесс фитоценологической трансформации ландшафта происходит как бы изнутри. Он меньше всего связан с преодолением биогенными потоками тех или иных природных границ. Скорость его проявления зависит главным образом от остроты конкурентных отношений старых и новых ценологических групп, их отдельных элементов и от соответствующих темпов смены доминантов. Процесс очаговой трансформации фитоценозов является, по-видимому, ведущим. Он эффективнее фронтального взаимодействия и способен вызвать гораздо более быстрое преобразование ландшафтно-зональной структуры территории, нередко со скачкообразными сдвигами зональных границ. При этом эффект фронтальных взаимодействий фитоценозов следует рассматривать как часть общего, преимущественно очагового, процесса ландшафтных перестроек.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЭТАП ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Прогнозное картографирование природных комплексов основывается на результатах их аналитического прогноза. В работах [2, 3] достаточно подробно изложена аналитическая часть методики регионального геоэкологического прогнозирования, основанная на принципе актуализма и использующая эргодические свойства климатической системы данного региона. Сущность аналитического прогноза состояла в первоначальной идентификации ландшафтных единиц определенными значениями базовых климатических условий, с последующей количественной оценкой направлений наиболее вероятных преобразований этих объектов в соответствии с ожидаемыми изменениями климата на заданные сроки. Выявлялся неоднозначный характер трансформации ландшафтов при заданном геофизическом тренде, когда новые состояния геосистемы будут иметь черты не одного, а нескольких состояний, известных на данный момент времени. Это достигается путем сравнения форм климатических ниш разных ландшафтов, представленных в виде «размытых» (дескриптивных) множеств [15].

Далее, с помощью методов теории конечных цепей Маркова [16] определялись потенциальные скорости преобразований климатических ниш геосистем, что позволило выйти на прогнозные оценки с заданной заблаговременностью. Для моделирования использованы дискретные марковские цепи первого порядка, обладающие очень короткой «памятью» в один шаг прогнозирования, в течение которого процесс считается стационарным.

По каждой паре объектов A и B рассчитывались две прогнозные характеристики: $P_{ii} \equiv K(A_0 \rightarrow A_1)$ — переход объекта A самого в себя (вероятность его устойчивости) и $P_{ij} \equiv K(A_0 \rightarrow B_0)$ — вероятность поглощения его объектом B (здесь « $\equiv$ » — знак тождества). Эти характеристики выражаются следующими мерами включения (« $\cap$ »):

$$K(A_0 \rightarrow A_1) = \frac{A_0 \cap A_1}{A_0}, \quad (1)$$

$$K(A_0 \rightarrow B_0) = \frac{(A_1 \cap B_0) - (A_0 \cap A_0)}{A_0}. \quad (2)$$

При этом $(A_0 \cap A_1) \neq (A_1 \cap A_0)$, т. е. отношения мер включения нетранзитивны [17].

Ландшафтно-экологический прогноз имеет принципиально вероятностный характер [3, 5], поэтому его операции проводятся с помощью дескриптивных («размытых») множеств, представленных в виде вектора-строки, где функция принадлежности элементов изменяется от 0 до 1 [15]. Расчетные формулы имеют следующий вид [17]:

$$K(A_0 \rightarrow A_1) = \frac{\sum_1^{NP} \min[L_i(A_0), L_j(A_1)]}{\sum_1^N L_i(A_0)}; \quad (3)$$

$$K(A_0 \rightarrow B_0) = \frac{\sum_1^{PQ} \min[L_j(A_1), L_k(B_0)] - \sum_1^{NQ} \min[L_i(A_0), L_k(B_0)]}{\sum_1^N L_i(A_0)}. \quad (4)$$

Здесь i, j и k — частные коэффициенты связи L в векторах, описывающих гидроэдафические ниши A_0, A_1 и B_0 , а N, P и Q — общие объемы соответствующих векторов. Аналогично рассчитываются величины переходов $K(A_0 \rightarrow C_0), K(A_0 \rightarrow D_0)$ и т. д. Для следующего состояния вычисляем $K(B_0 \rightarrow B_1), K(B_0 \rightarrow C_0), K(B_0 \rightarrow D_0)$ и т. д. На очередном прогнозном шаге рассчитываются свои меры переходов: $K(A_0 \rightarrow A_2), K(A_0 \rightarrow B_0), K(A_0 \rightarrow D_0), \dots; K(B_0 \rightarrow B_2), K(B_0 \rightarrow C_0), K(B_0 \rightarrow D_0), \dots$ В работе [3] подробно изложен алгоритм прогнозных расчетов ландшафтно-экологических переходов на основе регионального климатического прогноза, который обычно представлен изменениями средних температур января и июля, а также количества осадков холодного и теплого периодов.

На все прогнозные сроки для каждой i -й группы ландшафтов Волжского бассейна были рассчитаны (табл. 2): мера ее стабилизации P_{ij} и суммарные априорные вероятности P_i перехода ее во все другие группы; условные вероятности P_{ij} и суммарные скорости переходов M_i из ее ниши i в ниши

Таблица 2

Трансформация подтаежных ландшафтов вида 3/7 (моренных, элювиальных, гидролитоморфных, со сложными ельниками) в ландшафты других видов

Прогнозные сроки	Поглощающие виды ландшафтов	Параметры (см. в тексте)		
		P_{ij}	m_{ij}	h_{ij}
2050 г.	1/1	0,032	0,064	0,044
	1/2, 3	0,075	0,151	0,103
	1/9	0,037	0,075	0,052
	1/10	0,062	0,126	0,086
	2/1	0,126	0,253	0,173
	2/4	0,071	0,144	0,098
	2/5	0,028	0,057	0,039
	2/8	0,020	0,041	0,028
	3/1	0,020	0,041	0,028
	3/4	0,024	0,048	0,033
2075 г.	1/5, 7	0,036	0,067	0,026
	1/9	0,043	0,081	0,031
	1/10	0,055	0,103	0,040
	2/10	0,026	0,048	0,019
	3/1	0,025	0,046	0,018
	3/2	0,029	0,054	0,021
	3/3	0,039	0,073	0,028
	3/4	0,029	0,054	0,021
	3/5	0,049	0,091	0,033
	3/12	0,020	0,036	0,014
2100 г.	4/6	0,035	0,065	0,025
	1/3	0,036	0,058	0,019
	1/4	0,022	0,035	0,011
	1/5, 7	0,039	0,062	0,020
	1/9	0,040	0,064	0,021
	1/10	0,050	0,080	0,026
	2/1	0,065	0,105	0,034
	2/4	0,052	0,082	0,027
	2/5	0,088	0,142	0,046
	2/6	0,038	0,060	0,020
	2/8	0,050	0,080	0,026
	2/9	0,032	0,051	0,026
	4/6	0,039	0,062	0,020

Таблица 3

**Обобщенные характеристики ландшафтных переходов ниши вида ландшафтов 3/7 (см. табл. 2)
в ниши других видов**

Параметры	Вариант климатического прогноза		
	2050 г.	2075 г.	2100 г.
P_{ij}	0,505	0,462	0,378
M_{i1}	0,684	0,386	9,325
M_{i2}	1,368	0,772	0,649
M_{i3}	2,052	1,158	0,974
$t(\text{ш})$	1,462	2,590	3,081
$t(\text{г})$	29,234	51,806	61,627

Примечание. P_{ij} — мера стабилизации данного вида ландшафтов на прогнозируемые сроки; M_{i1} , M_{i2} и M_{i3} — суммарные скорости переходов данного вида ландшафтов в другие виды соответственно к 2050, 2075 и 2100 гг.; $t(\text{ш})$ и $t(\text{г})$ — суммарное время, необходимое для полной трансформации ландшафтов данного вида (выражено соответственно в числах шагов и в годах). Климатические сценарии на 2050, 2075 и 2100 гг. являются определенными вариантами прогноза, и по каждому из них оцениваются изменения ландшафтно-экологических условий для одних и тех же этапов — самих прогнозных сроков. Варианты климатического прогноза существенно различаются по своим ландшафтно-динамическим характеристикам.

других групп j ; абсолютная h_{ij} и относительная m_{ij} парциальные скорости ее перехода в нишу j -й группы (табл. 3); выраженное в числе шагов время $T(P_{ij})$ пребывания объекта в состоянии P_{ij} , т. е. до того момента, как оно сменится всеми другими состояниями. Умножая величину $T(P_{ij})$ на продолжительность шага, выражаем время пребывания объекта в количестве лет. Расчетные формулы указанных характеристик имеют следующий вид [16]:

$$\begin{aligned}
 P_i &= 1 - P_{ii}; \\
 M_i &= (1 - P_{ii})/d; \\
 m_{ij} &= P_{ij}/P_i \\
 T(P_{ii}) &= 1/M_i; \\
 h_{ij} &= P_{ij} - M_i/P_i = m_{ij} - M_i,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где d — число шагов (в расчетах это интервалы 1985–2050, 2050–2075 и 2075–2100 гг.). За начальный год составления прогноза с учетом современных тенденций глобального потепления [12] принят 1985 г.

В матрицах функциональных переходов геосистем по каждому из трех прогнозных интервалов, имеющих продолжительность, соответственно, в 1, 2 и 3 шага, переходные вероятности P_{ij} для одной и той же пары $i \rightarrow j$ ландшафтных групп оказывались неодинаковыми. Таким образом, имеем нестационарную марковскую цепь переходных вероятностей с нетождественными преобразованиями, где $P_{ij}(\tau) \neq P_{ij}$ [20].

ПРОГНОЗНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОЧАГОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЛАНДШАФТОВ

Процессы множественных преобразований природных комплексов слагаются целой серией взаимных переходов одних ландшафтных (точнее — фитоценологических) ниш в другие не только на уровне зональных типов и подтипов ландшафтов, согласно климатическому тренду, но и между различными родами, т. е. морфогенетическими единицами, связанными с особенностями литогенной основы. Таким образом, фоновый климатический сигнал вызывает определенный «ландшафтно-родовой дрейф» фитоценологического ядра геосистем в пределах данной природной зоны (подзоны), причем потенциально не менее значимый, чем само зональное смещение границ ареала того или иного вида ландшафтов. В приведенном примере (табл. 4), согласно моделям GISS и EGISS, при термогумидном тренде к 2050 и 2075 гг. климатические ниши подтаежных ельников холмисто-моренных равнин (вида ландшафтов 3/7) будут замещаться нишами, с одной стороны, хвойных, смешанных и даже широколиственных лесов, ныне произрастающих на эрозионно-денудационных и эрозионных междуречьях (видов 2/1, 3/1–3/4, 4/5, 4/6), а с другой, — елово-сосновых и хвойно-широколиственных комплексов долинных задров и озерно-аллювиальных равнин (видов 2/10, 3/12, 4/12).

Таблица 4

Матрицы абсолютных парциальных мер h_{ij} (2) скоростей переходов ниши вида ландшафтов 3/7 (см. табл. 2) в ниши других видов, принадлежащих различным природным зонам (подзонам) и родам ландшафтов

Природная зона (подзона)	Роды ландшафтов (см. табл. 1)								Сумма
	Э-Д	Э	М	Д-З	М-З	ОЗ-АЛ	З	Д/ З	
Прогноз на 2050 г.									
Средняя тайга	0,350				0,093				0,443
Южная тайга	0,138		0,039	0,088		0,011			0,276
Подтайга	0,022			0,030		0,050			0,107
Сумма	0,510		0,039	0,118	0,093	0,066			0,727
Прогноз на 2075 г.									
Средняя тайга	0,035		0,026	0,093			0,028		0,182
Южная тайга	0,138		0,039	0,088			0,011		0,276
Подтайга	0,053	0,025		0,080			0,055	0,004	0,217
Широколиственные леса		0,045			0,015	0,012			0,072
Лесостепь	0,017	0,022							0,039
Сумма	0,270	0,135	0,065	0,261	0,015	0,012	0,094	0,004	1,055
Прогноз на 2100 г.									
Средняя тайга	0,035		0,057	0,110			0,047		0,249
Южная тайга	0,165		0,095	0,112	0,016	0,010	0,021	0,006	0,425
Подтайга	0,053	0,025		0,080			0,055	0,004	0,217
Широколиственные леса		0,075			0,025	0,012			0,112
Лесостепь	0,017	0,035							0,052
Сумма	0,270	0,092	0,152	0,302	0,041	0,022	0,123	0,010	1,055

Для картографирования ландшафтно-экологических условий будущего необходимо иметь интегральную картину трансформации климатических ниш геосистем. С этой целью было проведено обобщение (с нарастающим итогом [3]) значений h_{ij} для каждого вида ландшафтов в двумерной системе координат: по признаку биоклиматической зональности и по родовому признаку. Такое обобщение для вида ландшафтов 3/7 приведено в табл. 3. Сумма скоростей переходов по строкам характеризует темп смены климатических ниш, который определяет межзональную очаговую фитоценологическую трансформацию ландшафтов данного рода и вида, а сумма по столбцам — скорость «поглощения» данной ниши нишами других ландшафтных родов независимо от зональной и видовой принадлежности последних. Итоговая сумма $\Sigma \Sigma h_{ij}$ (2) (в правом нижнем углу матрицы) представляет собой аналог величины M_r , при этом учитывающий ограничения, накладываемые на скорости ландшафтных переходов фактором родовой принадлежности видов ландшафтов. Оценка таких ограничений состояла в следующем.

Межзональное преобразование данного вида ландшафтов в другой вид будет наиболее вероятным и быстрым в пределах одного и того же рода геосистем или близких родов. «Родовой барьер» должен отрицательно сказаться на скоростях ландшафтных переходов. Резкая смена физико-механических свойств почвообразующих пород, формы равнинного рельефа и типа местоположения служат существенным препятствием для взаимной трансформации соседних ландшафтов разного вида, находящихся по обе стороны от литогенной границы. Такие природные рубежи будут смещаться в последнюю очередь и с наименьшей скоростью, поэтому высоту «родового барьера» необходимо учитывать в процедуре дальнейшей корректировки полученных расчетных скоростей h_{ij} ландшафтных переходов.

Учет высоты «родового барьера» производился с помощью поправочного коэффициента K_{pb} , который в целом характеризует относительные родовые контрасты между различными видами ландшафтов. Был использован подход, предложенный в работе [18] для оценки контрастности ландшафтной структуры территории. В целях вычисления K_{pb} все восемь родов ландшафтов были расположены, согласно [8, 9], в один морфогенетический (парагенетический) ряд (см. табл. 1) в общем направлении от водоразделов к днищам долин:

$$\text{Э-Д} \rightarrow \text{Э} \rightarrow \text{М} \rightarrow \text{Д-З} \rightarrow \text{М-З} \rightarrow \text{ОЗ-АЛ} \rightarrow \text{З} \rightarrow \text{Д/З}.$$

Чем дальше отстоят друг от друга в этом ряду два рода ландшафтов, тем, очевидно, выше литогенная контрастность между ними и тем, соответственно, более медленным будет процесс межродовых переходов видов ландшафтов в случае пересечения их климатических ниш.

В морфогенетическом ряду насчитывается восемь интервалов (шагов), которые предложено называть парагенетическим расстоянием, или индексом $C(j,i)$ [2, 3]. Например, в трансграничной связке видов ландшафтов 2/1(Э)–1/3(Т) это расстояние равно одному шагу, в паре 2/5(Э)–1/9(ТА) — двум шагам, а для наиболее удаленных друг от друга по типу местоположения видов 4/5(ТЭ) и 3/12(А) насчитывается четыре шага. Условно принимаем, что каждый i -й интервал (шаг) имеет «вес» $\Delta Q_i = 0,1$ (для озерно-аллювиальных ландшафтов $\Delta Q_i = 0,2$). У максимального интервала общая сумма «весов» $\Delta Q_{ij} = 0,9$. Это относится к Э-Д и Д/З ландшафтам, которые занимают крайние положения в морфогенетическом ряду и поэтому обладают минимально возможной взаимной трансформацией. Поправочный «родовой» коэффициент как величина, обратная парагенетическому расстоянию, равен:

$$K_{pb} = 1 - n \cdot (\Delta Q_i), \quad (7)$$

где n — число интервалов, отделяющих в морфогенетическом ряду рассматриваемый вид ландшафта от вида, в который он должен трансформироваться. Таким образом, скорректированная на величину «родового барьера» абсолютная скорость ландшафтных переходов $h_{ij}(2)$ равна:

$$h_{ij}(2) = K_{pb} \cdot h_{ij}. \quad (8)$$

Матрица мер $h_{ij}(2)$ достаточно полно описывает зонально-региональное многообразие скоростей ландшафтных переходов, позволяя оценить на каждом шаге как общее число и преобладающие направления преобразований ниш данного вида ландшафтов, так и парциальные и суммарные темпы этих процессов. Например, для смешаннолесных моренных ельников (вида ландшафтов 3/7, см. табл. 4) в течение прогнозного периода будут характерны: тенденция роста многообразия их переходов в другие виды; сохранение преобладающей трансформации в соседние Э-Д и лежащие ниже по склонам Д/З-геосистемы; доминирование смен подтаежных фитоценозов южно- и среднетаежными; повышенные скорости трансформации в начале и конце прогнозного периода и явное их снижение на втором шаге; достижение полной смены климатических ниш к 2100 г.

Суммированные по строкам матрицы значения $h_{ij}(2)$, за исключением переходов внутри «своей» зоны, позволяют оценить скорости межзональной трансформации экологических ниш рассматриваемого вида ландшафтов. Так, у подтаежных геосистем вида 3/7 такие суммарные скорости перехода в ниши других зон составляют для трех прогнозных сроков, соответственно, 0,404, 0,358 и 0,828.

По матрицам скоростей ландшафтно-экологических переходов $h_{ij}(2)$, рассчитанным по всем видам ландшафтов, производилось преобразование современных ландшафтных ареалов в ареалы будущих равновесных состояний геосистем (рис. 3). Подчеркнем, что прогнозная карта характеризует не само размещение ландшафтных ареалов в заданный прогнозный срок, а мозаику тех ландшафтно-экологических условий, которые сложатся к этому сроку на данной территории и в соответствии с которыми произойдут, прежде всего, сдвиги в функционировании ландшафтов [3]. Именно поэтому прогнозная карта, будучи статичной прогнозной моделью, называется ландшафтно-экологической, а не ландшафтной. Первоочередной предмет прогнозного картографирования, отображенный на рис. 3, а и б, представляет собой зональное преобразование геосистем, выраженное суммой $h_{ij}(2)$ по строкам матрицы скоростей переходов климатических ниш (см. табл. 2).

На прогнозных картах (см. рис. 2) показаны две динамические характеристики: 1) преобладающая тенденция переходов ниши данного вида ландшафтов из «своей» природной зоны (подзоны) в нишу другой зоны — по наибольшей сумме $h_{ij}(2)$, полученной по строкам матрицы (см. табл. 3); 2) общая степень межзональной трансформации ландшафтов данного вида — по суммарным значениям $h_{ij}(2)$, взятым по строкам и столбцам матрицы, за вычетом суммы $h_{ij}(2)$ по строке, соответствующей «своей» природной зоне. Обе указанные характеристики отражены в легенде к прогнозным картам ландшафтно-экологических условий (см. рис. 2). Выделены следующие градации степени суммарной трансформации ландшафтов; слабая (менее 25 %), средняя (26–50 %), повышенная (51–75 %), высокая (более 75 %).

Наряду с этим важно было учитывать весь спектр направлений зональной дифференциации каждого вида ландшафтов, что отражено в легенде к прогнозным картам. Например, смешаннолесные ландшафты вида 3/7 в течение первого шага (до 2050 г.) будут приобретать преимущественно южно-



Общая степень межзональной трансформации ландшафтов, %	Преобладающие переходы в ландшафты природных зон (подзон)			
	средней тайги	южной тайги	смешанных лесов	широколиственных лесов
до 25				
26–50				
51–75				
более 75				

Рис. 3. Фрагменты карт направлений и мер очаговой трансформации видов ландшафтов Волжского бассейна на прогнозные сроки 2050 г. (а) и 2100 г. (б) по климатическим сценариям, согласно моделям GISS и EGIS.

Усл. обозн. — см. рис. 1.

Таблица 5

Интегральные меры (%) прогнозируемой межзональной трансформации южнотаежных ландшафтов вида 2/1 (эрозионно-денудационных, элювиальных, гидролитоморфных, с пихтово-еловыми лесами)

Поглощающие зональные (подзональные) типы (подтипы) ландшафтов	Прогнозируемые сроки, год		
	2050	2075	2100
Средняя тайга	15	15	18
Подтайга	28	39	49
Широколиственные леса	23	45	53
Средняя и южная лесостепь	12	16	21

Таблица 6

Мера $h_{ij}(2)$ межродовой трансформации подтаежных ландшафтов вида 3/2 (эрозионно-денудационных, трансэлювиальных, литоморфных, с широколиственно-пихтово-еловыми лесами), %

Роды ландшафтов, имитирующие поглощающие состояния	Прогнозируемые сроки, год		
	2050	2075	2100
Моренные	5	9	11
Денудационно-зандровые	18	18	22
Моренно-зандровые	11	12	14
Озерно-аллювиальные	25	6	
Зандровые	44	5	
Долинно-зандровые	11	1	

таежный облик с суммарной величиной межзональных преобразований их климатических ниш в пределах 25–50 % (см. рис. 3). Такая тенденция сохранится и на последующих шагах при дальнейшем росте общей меры трансформации.

Легенда к прогнозным ландшафтно-экологическим картам отражает достаточно резкую и разнонаправленную межвидовую дивергенцию климаареалов геосистем. Так, южнотаежные Э-Д ландшафты вида 2/1 сначала будут стремиться перейти в подтаежные (табл. 5), однако в них ожидается также существенная доля широколиственных элементов. В западинах и на северных склонах создадутся условия для внедрения бореальных среднетаежных фитоценологических группировок. Наконец, в фитоценозах урочищ южных склонов ожидается появление представителей лесостепи.

Во многих случаях у ландшафтов будет видоизменяться не столько зональный биоклиматический тип (подтип), сколько эдафическое увлажнение. Примером служат подтаежные ландшафты вида 3/2 в низовьях Камы и Вятки (табл. 6). На всех этапах своих преобразований эти ландшафты останутся подтаежными с межзональной трансформацией до 30–50 %. Основные же изменения будут состоять в повышении эдафического увлажнения. Такому тренду благоприятствует наличие в современных ландшафтах вида 3/2 гидролитоморфных и субгидроморфных урочищ (они занимают около 10 % площади). Можно ожидать, что в этих геосистемах на всех прогнозных этапах термогумидного тренда возрастет заболачивание и усилится роль бореальных элементов растительности.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ И КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИНДУКЦИОННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЛАНДШАФТОВ

Не меньший интерес вызывает прямое трансграничное взаимодействие соседних геосистем и обусловленные им возможные сдвиги природных границ как результат индукционного преобразования ниш фитоценозов. Методика этих оценок такова. Матрицы вероятностей ландшафтно-экологических переходов (см. табл. 1) представляют собой лишь первое приближение к реальной картине, поскольку они строятся на основе только пространственно-временного разнообразия климатических ниш видов ландшафтов и не учитывают влияния усиливающих или, наоборот, ограничивающих факторов, связанных с самой ландшафтной текстурой региона. Речь идет, прежде всего, о типах ландшафтных границ и о порядке ландшафтного соседства [5, 19–21], поэтому применяемые методы расчета скоростей смены ниш, с использованием конечных цепей Маркова, позволяют оценить потенциально возможные, а не близкие к реальности, темпы фитоценологической трансформации при-

родных комплексов. Можно предполагать, что элементы матрицы переходных вероятностей и все последующие расчетные параметры переходов (M_i , P_{ij} , m_{ij} , h_{ij}) характеризуют некоторое гипотетическое множество усредненных скоростей трансформации ниш видов ландшафтов при следующих условиях: повсеместности мембранных (полупроницаемых) границ (по определению [19]) и наличия только соседств первого порядка для конкретных бинарных отношений ландшафтных ареалов. Последнее условие выполнимо в том случае, когда ареал каждого вида ландшафта окружен только двумя соседями, что обеспечивает однозначную направленность и равномерность цепи ландшафтных переходов.

Между тем ландшафтная текстура должна существенно преломлять такую гипотетическую систему преобразований геосистем. Уже сам тип природной границы будет вносить коррективы в процесс трансформации ландшафтов, делая его многоплановым и неоднозначным. Коннекционные (функционально-контактные) границы формируются в условиях миграционного типа ландшафтных сопряжений [21] и в целом должны способствовать трансформации контактирующих геосистем. Барьерные же границы (дивергентные гребневые и конвергентные ложбинные) будут, наоборот, препятствовать этому [20]. Кроме того, при наличии барьерных границ вероятность преобразования одного вида ландшафтов в другой должна быть, по-видимому, тем меньше, чем ниже порядок их соседства, т. е. чем большее число промежуточных ландшафтных видов их разделяет.

Исходя из этих допущений, для расчета индуктивной составляющей потенциальной фитоценологической трансформации ландшафтов автором предложено использовать поправочный «текстурный коэффициент» $C_m(j, i)$, который равен:

$$C_m(i, j) = \prod_1^n C(j, i) + 1, \quad (9)$$

$$C_m(i, j) = \prod_1^n 2P(i, j)/P(i), \quad (10)$$

где $C(j, i)$ — парагенетическое расстояние (индекс) между i -м (A) и j -м (B) видами ландшафтов (см. выше); $P(i, j)$ — вероятность совместной встречаемости их ареалов; $P(i)$ — априорная вероятность соседств i -го вида ландшафтов, Π — знак произведения, n — порядок ландшафтного соседства (в данном случае число границ, разделяющих ареалы этих видов). Очевидно, при $n = 1$, т. е. при соседстве первого порядка, i -м видом ландшафтов является A , а j -м видом — B . Если же $n > 1$, то виды A и B участвуют лишь как сомножители соседства n -го порядка. Произведение парагенетических индексов (для $n > 1$) дает величину, аналогичную условной вероятности, что отражает резкое падение вероятности взаимной трансформации видов ландшафтов, разделенных несколькими границами барьерного типа. Прибавление 1 к $C(j, i)$ в расчетной формуле позволяет избежать отрицательных значений текстурного коэффициента. Отклонение текстурного коэффициента от 1 в ту или другую сторону означает смену мембранного (промежуточного) типа ландшафтной границы на коннекционный или, наоборот, на барьерный. Коннекционным границам будет соответствовать коэффициент $C_m(B, A) > 1$, повышающий, таким образом, вероятность ландшафтных переходов, а барьерным границам — коэффициент $C_m(B, A) < 1$, снижающий эту вероятность.

Расчеты показали, что оценку индукционной составляющей трансформации ареалов геосистем имеет смысл давать только для ландшафтных соседств первого порядка, поскольку уже при втором порядке соседства текстурный коэффициент становится, как правило, ничтожно малым. Так, для ландшафтов вида 3/7 имеется следующая цепь индукционной трансформации его в другие виды, с соответствующими текстурными коэффициентами:

$$3/7 \rightarrow 2/6 \rightarrow 1/9.$$

$$0,16 \quad 0,33$$

Итоговый коэффициент трансграничных ландшафтных переходов подтаежных моренных сложных ельников (3/7) в среднетаежные зандровые сосняки (1/9) равен $0,16 \cdot 0,33 = 0,05$. Столь незначительной величиной коэффициента уже можно пренебречь.

На рис. 4 представлены прогнозные на 2100 г. оценки индукционной трансформации ландшафтных ареалов — соседей первого порядка. Мера сдвига ландшафтной границы $h_{ij}(3)$ рассчитывалась (с нарастающим итогом трех шагов) как

$$h_{ij}(3) = C_m(j, i) \cdot h_{ij}. \quad (11)$$

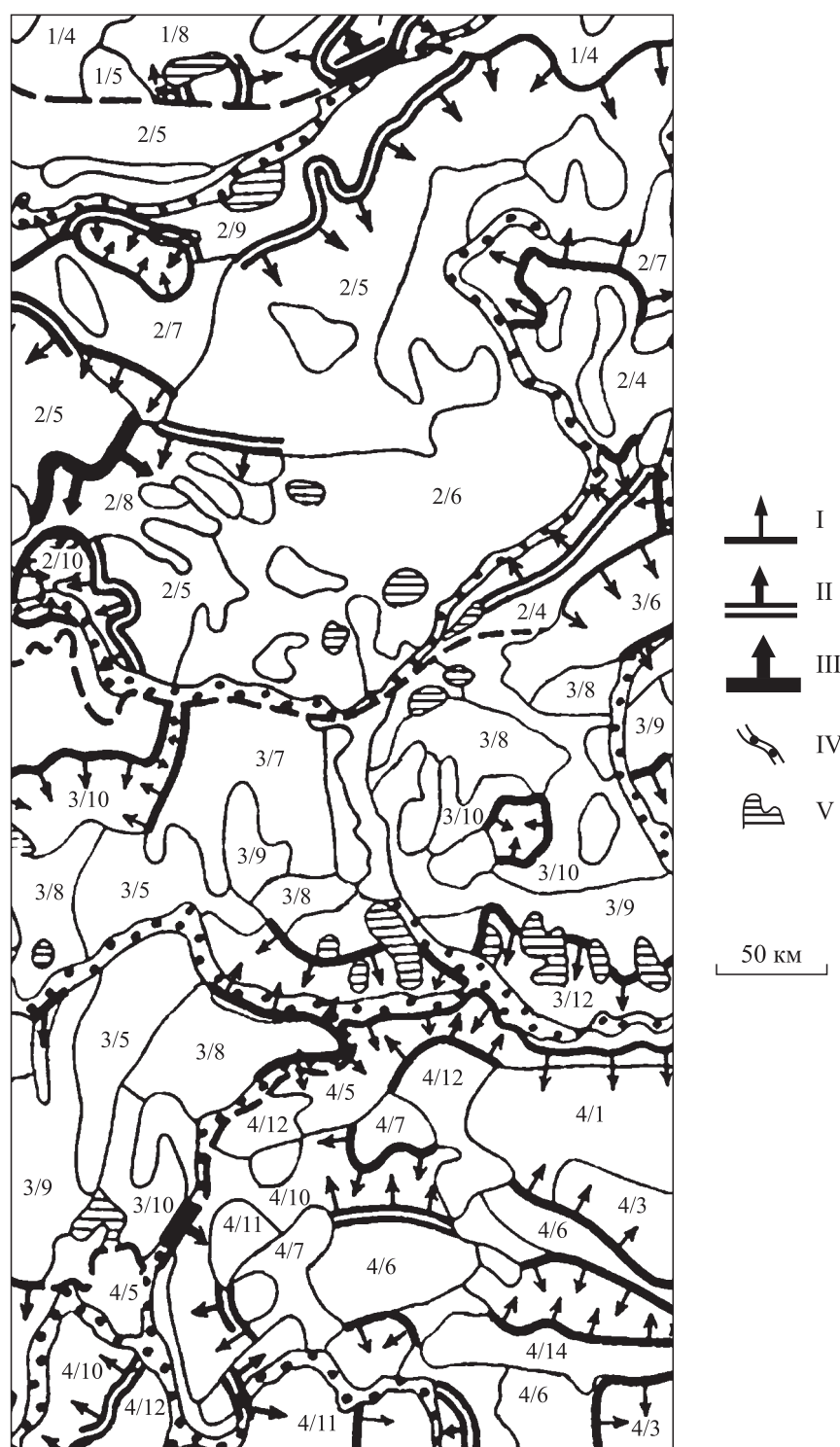


Рис. 4. Фрагмент карты индукционной трансформации видов ландшафтов Волжского бассейна на прогнозный срок 2100 г., согласно климатическому сценарию по модели GISS.

Мера сдвига ландшафтных границ $h_{ij}(3)$: I — 0,1–0,05; II — 0,06–0,104; III — 0,11–0,15. Ландшафты: IV — речных долин, V — болотные. Виды ландшафтов — см. рис. 1.

Вектор сдвига природных границ указан стрелками, а относительные потенциальные скорости поглощения одного ландшафтного ареала другим (в %) — системой линий различной толщины, проходящей по данному природному рубежу. На первые два прогнозных срока картина смещения границ почти идентична. По многим ландшафтным соседствам изменения ощутимо проявятся лишь к 2100 г.

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ПРОГНОЗНЫХ СЦЕНАРИЕВ

Согласно модели GISS, для средней полосы Русской равнины в первые десятилетия ожидается более высокий рост температуры не в холодный, а в теплый период года. К 2050 г. на большей части Волжского бассейна средняя июльская температура вырастет на 1,1–1,3 °С, а в подтаежной зоне и подзоне широколиственных лесов местами на 1,5–1,7 °С. Среднеянварская же температура повысится гораздо меньше — в основном не более 0,2–0,5 °С (в Верхнем Поволжье прирост до 1,4 °С). В 2075 г. темпы потепления в целом сохранятся, однако рост температур будет выравниваться и превысит 2,2–2,3 °С по сравнению с базовым периодом. В тайге Верхнего Поволжья преобладающим окажется уже зимнее потепление (на 3,6 °С), однако в большинстве районов сохранится летний приоритет. Наконец, к 2100 г. рост среднеянварской температуры станет доминирующим (до 4,5–5 °С в зоне южной и средней тайги и в широколиственных лесах).

Антропогенное потепление будет сопровождаться увеличением количества осадков, однако в направлении с севера на юг этот рост существенно замедлится. К 2050 и 2100 гг. в средней и южной тайге годовая сумма осадков возрастет, соответственно, на 100–120 и 200–270 мм, а в лесостепи и северной степи — на 60–80 и 100–150 мм соответственно. В результате годовой коэффициент увлажнения Высоцкого–Иванова в целом по лесной зоне Русской равнины снизится весьма незначительно: к 2050, 2075 и 2100 гг., соответственно, на 0,05, 0,10 и 0,12, что позволяет отнести данный климатический тренд к категории термогумидного. Более поздняя модель EGISS вообще дает до 2050 г. холодно-гумидный тренд с понижением летних и зимних температур на 0,5–1,9 °С и с ростом коэффициента увлажнения на 0,06–0,25. И только к 2100 г. незначительный рост среднеиюльских температур (до 0,3–0,4 °С) вызовет снижение коэффициента на 0,02–0,13.

Ожидаемое повышение температуры и рост годового атмосферного увлажнения приведут к неизбежному расширению экологического пространства в каждой природной зоне, что вызовет соответствующее усложнение зональных структур региона и общее повышение степени его экотонизации. Создадутся условия для сдвига многих ландшафтных границ под влиянием очаговых и фронтальных преобразований гидротермических ниш фитоценозов (см. рис. 3 и 4). Доминирующими экзогенными сукцессиями будут, во-первых, замещение травянистых (степных и лугово-степных) ассоциаций древесными (лесными), а во-вторых, — смена широколиственно-лесных фитоценозов смешанно- и хвойнолесными. Это объясняется более высокой чувствительностью зональных типов растительности Русской равнины к увеличению количества атмосферных осадков. Массовая трансгрессия бореальных элементов в подзону широколиственных лесов и даже в зону лесостепи — одно из феноменальных прогнозируемых явлений по данным моделям на бореальном экотоне Волжского бассейна, особенно в его западной части.

Фитоценозы северостепных ландшафтов испытают наименьшее влияние лесных природных зон. Зональных переходов здесь не обнаружено ни на одном из прогнозных этапов. Тем не менее с 2075 г. сюда начнут внедряться хвойные породы и таежные элементы напочвенного покрова. Сосновые леса песчаных ландшафтов во многом приобретут среднетаежный облик. В подзоне северной лесостепи поглощение широколиственных лесов южно- и даже среднетаежными «пришельцами» будет происходить во всех ландшафтах, за исключением озерно-ледниковых и эрозионно-денудационных. В последних, наоборот, появятся степные и лесостепные ассоциации.

Смешанные леса будут активно поглощаться южной тайгой. В ландшафтах Д/З, З и ОЗ-АЛ с их невысокой трофностью субстрата можно ожидать даже проникновение среднетаежной растительности. В трансэлювиальных и элювиальных ландшафтах наиболее вероятно внедрение лесостепных фитоценозов и усиление позиций широколиственных лесов. В ЭД и ОЗ-АЛ суглинистых ландшафтах южно-таежная растительность будет сменяться широколиственно-лесной, в то время как среднетаежные элементы проникнут в ландшафты с песчаным субстратом. В средней тайге ожидается трансформация практически всех видов ландшафтов (за исключением моренных комплексов) в смешанно- и широколиственно-лесные, отчасти — в южнотаежные. Наконец, вероятно внедрение широколиственно-лесных и лесостепных элементов в бореальную зону. До 2050 г. это произойдет в зоне средней тайги, а

также в южной тайге Вятских Увалов и Верхнекамской возвышенности. На втором шаге в южную тайгу и подтайгу ожидается внедрение неморальных и лесостепных видов и целых ассоциаций. На третьем шаге этот процесс ослабнет.

Наиболее ярко выраженная трансгрессия зональных геопространств с севера на юг проявится в западном семигумидном секторе Волжского бассейна, а их трансгрессия с юга на север — в восточном семиаридном секторе, поэтому сформированная к концу прогнозного периода ландшафтно-зональная структура бореального экотона будет иметь более резко выраженную меридиональную асимметрию, чем в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изложенном материале представлен один из рабочих вариантов концепции регионального ландшафтно-экологического прогнозирования, развивающий известные положения теории биогеографических и ландшафтных экотонов и доведенный до построения аналитических и картографических прогнозных моделей для крупного региона. Прогнозное картографирование дифференцировано по территории с учетом свойств ландшафтной структуры и текстуры — морфогенетических комплексов, типов и видов границ, направления и силы парагенетических связей. Это позволило внести определенную корректировку в скорости сдвига самих ландшафтных границ, выявить относительный временной шаг трансформации конкретных ландшафтных ареалов.

Проведенный научный поиск был нацелен на обогащение региональными прогнозными аспектами одного из фундаментальных положений комплексной физической географии — географической зональности. Исследование проведено на примере бореального экотона Волжского бассейна как макросистемы с наиболее ярко выраженными экологическими эффектами природных взаимодействий.

Необходимо подчеркнуть очевидные ограничения закартированных и описанных прогнозных сценариев. В них имеются в виду главным образом изменения в структуре растительного покрова как наиболее чувствительного и динамичного природного компонента. Между тем весьма многообразная динамика растительности складывается не только ее экзогенными, но и эндоэкогенетическими сукцессиями [4], что нередко затрудняет выявление по ней экологических следствий внешних воздействий. В связи с этим целесообразно использовать еще один, причем не менее важный, прогнозный индикатор — почву как более инертный, но и более устойчивый компонент ландшафта. Как известно [22], главной узловой точкой в необратимом преобразовании ландшафта служит смена типа почвообразования.

Изложенные научно-методические разработки могут войти в методологический арсенал геосистемного мониторинга путем создания региональных моделей глобальных изменений природной среды. Полученные результаты показывают, что региональный прогнозный ландшафтно-экологический анализ открывает один из перспективных путей решения глобальных экологических проблем современности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (94–05–17636–а, 04–05–965–а, 18–05–000–24–а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сочава В.Б.** Избранные труды. Теоретическая и прикладная география. — Новосибирск: Наука, 2005. — 288 с.
2. **Коломыц Э.Г.** Бореальный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. — М.: Наука, 2005. — 390 с.
3. **Коломыц Э.Г.** Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. — М.: КМК, 2018. — 716 с.
4. **Сукачев В.Н.** Избранные труды. Т. 3: Проблемы фитоценологии. — Л.: Наука, 1975. — 543 с.
5. **Симонов Ю.Г.** Основные свойства объектов географического прогнозирования и способы их формализованного описания // Проблемы регионального географического прогноза. — М.: Наука, 1982. — С. 112–193.
6. **Исаченко А.Г.** Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. — М.: Высш. шк., 1965. — 327 с.
7. **Николаев В.А.** Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 62 с.

8. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. — 230 с.
9. Мильков Ф.Н. Физическая география. Современное состояние, закономерности, проблемы. — Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1981. — 398 с.
10. Предстоящие изменения климата. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля, А.Д. Маккракена, А.Д. Хекта. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 272 с.
11. Hansen J., Sato M., Ruedy R., Kharecha P. Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E // Climate Dynamics. — 2007. — Vol. 29. — P. 661–696.
12. Climate Change 1995. The Science of Climatic Change / Eds. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell. — Cambridge, UK: The Cambridge Univ. Press, 1996. — 572 p.
13. Удра И.Ф. Расселение растений и вопросы палео- и биогеографии. — Киев: Наук. думка, 1988. — 198 с.
14. Работнов Т.А. Фитоценология. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 384 с.
15. Odeh Inakwu O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J. Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system // Soil Sci. Soc. Amer. Journ. — 1992. — Vol. 56. — P. 1848–1854.
16. Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. Пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — 319 с.
17. Сёмкин Б.И. Дескриптивные множества и их приложения // Исследования систем. 1. Анализ сложных систем. — Владивосток: Изд-во Тихоокеан. ин-та географии ДВНЦ АН СССР, 1973. — С. 83–94.
18. Ивашутина Л.И., Николаев В.А. Изучение контрастности ландшафтных сопряжений в целях обоснования физико-географического районирования // Ландшафтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. — С. 59–73.
19. Преображенский В.С. Организация, организованность ландшафтов (препринт). — М.: Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1986. — 20 с.
20. Родоман Б.Б. Территориальные ареалы и сети: Очерки теоретической географии. — Смоленск: Ойкумена, 1999. — 225 с.
21. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. — М.: Наука, 2006. — 252 с.
22. Мамай И.И. Динамика ландшафтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. — 167 с.

Поступила в редакцию 23.03.2020

После доработки 05.02.2021

Принята к публикации 24.06.2021