

УДК 9.929 + 57.557 + 50.502/504
AGRIS F70

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/07>

ЭМПИРИКО-ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ ПРИ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА

©*Коломыц Э. Г.*, ORCID: 0000-0001-8849-6191, SPIN-код: 7038-2568,
д-р геогр. наук, Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
г. Пушкино, Россия, gk2000@mail.ru

EMPIRICAL-IMITATIONAL METHOD FOR PREDICTIVE MODELING OF FOREST GEOSYSTEMS UNDER GLOBAL CLIMATE CHANGE

©*Kolomyts E.*, ORCID: 0000-0001-8849-6191, SPIN-code: 7038-2568,
Dr. habil., Pushchino Science Center of Russian Academy of Sciences, Institute of Basic
Biological Problems, Pushchino, Russia, egk2000@mail.ru

Аннотация. Предложена рабочая концепция эмпирической имитации прогнозируемых сценариев лесных биогеоценозов в процедуре их наземного экологического мониторинга при глобальных изменениях климата. Ландшафтно-экологический прогноз базируется на эмпирически установленных локальных ландшафтно-экологических связях, которые рассматриваются в качестве механизмов метаболических реакций лесных сообществ на определенные климатические тренды, в соответствии с фундаментальными свойствами эргодичности природной среды. Представлена система этих связей, используемая в прогнозной процедуре. Установлено локальное отображение регионального биоклиматического тренда гидро-термоэдафической системой биогеоценозов. Рассмотрена полизональность локальных геосистем как способ их реакции на изменения климата. На основе гидротермического ординационного анализа выявлены климатогенные изменения дискретных параметров биологического круговорота. Ландшафтно-экологический прогноз представлен системой операций с климатическими нишами изучаемых объектов. Отмечены определенные временные ограничения эмпирико-имитационного метода ландшафтно-экологического прогнозирования и намечены возможные пути их преодоления.

Abstract. A working concept for empirical simulation of predicted scenarios of forest biogeocenoses in the procedure of their ground-based environmental monitoring under global climate change is proposed. The landscape-ecological forecast is based on empirically established local landscape-ecological relationships, which are considered as mechanisms of metabolic responses of forest communities to certain climatic trends, in accordance with the fundamental properties of the ergodicity of the natural environment. A system of these relationships used in the forecast procedure is presented. A local reflection of the regional bioclimatic trend by the hydrothermoedaphic system of biogeocenoses is established. The polyzonality of local geosystems as a way of their response to climate change is considered. Based on hydrothermal ordination analysis, climatogenic changes in discrete parameters of the biological cycle are revealed. The landscape-ecological forecast is presented as a system of operations with climatic niches of the studied objects. Certain time limitations of the empirical-simulation method of landscape-ecological forecasting are identified, and possible ways to overcome them are outlined.

Ключевые слова: глобальные изменения климата, лесные геосистемы, экологические ниши, базовые ландшафтно-экологические связи, эмпирико-имитационный метод географического прогнозирования.

Keywords: global climate change, forest geosystems, ecological niches, basic landscape-ecological relationships, empirical-simulation method of geographical forecasting.

Экологическая безопасность континентальной биосферы в значительной степени зависит от состояния зонально-региональных типов природных экосистем, и в первую очередь лесного покрова, который играет на суше важнейшую роль в сохранении водных ресурсов и смягчении климатических колебаний. Эта проблема становится актуальной в условиях начавшегося глобального потепления с его весьма разнообразными и порой трудно предсказуемыми экологическими последствиями.

Численные прогнозы биосферных процессов и явлений проводятся обычно с помощью динамических имитационных моделей (ДИМ). Последние представляют собой ту или иную замену реальной «системной сложности» некоторой абстрактной структурой, с декомпозицией и упрощением рассматриваемых закономерностей ее структуры и функционирования в условиях априорной неопределенности [1].

Наибольшие успехи достигнуты в создании концептуально-балансовых моделей различных типов географической среды и растительных сообществ, а также в построении моделей поведения экосистем в условиях техногенного загрязнения природных сред [2, 3].

Вместе с тем, давая достаточно глубоко проработанные прогнозные сценарии по отдельным геокомпонентам, ДИМы не могут дать нам целостного представления о будущем облике самой гео(эко-)системы, о степени ее устойчивости при новых сочетаниях средообразующих параметров. Сами разработчики этих моделей признают, что «... в значительном количестве работ по моделированию ... отсутствуют данные по экспериментальному обоснованию использованных в модели параметров» [2].

К тому же подобные модели не охватывают территориального многообразия сукцессионных смен при одном и том же фоновом воздействии, т.е. они могут быть «неадекватны в пространстве» [4].

Естественно, географическая экология не может ограничиваться подобным типом моделирования, поскольку имеет дело с территориально дифференцированными и многокомпонентными гео(эко-)системами ландшафтного уровня.

Разработанный автором ландшафтно-экологический анализ пространственной организации природных комплексов и их климатогенной динамики основан на построении дискретных эмпирико-статистических моделей их структуры и функционирования, по определению [1].

В составе данных моделей предложен и реализован метод эмпирической имитации прогнозируемых геоэкологических ситуаций [5, 6].

В нем эмпирически установленные локальные и региональные ландшафтно-экологические связи используются в качестве механизмов метаболических реакций лесных экосистем на те или иные климатические тренды. Возможности широко применять в прогнозном анализе результаты полевых ландшафтных исследований, а также различные картографические материалы позволяют получать результаты с высокой степенью пространственного разрешения.

Предмет эмпирико-имитационного прогнозного моделирования. В качестве исходного объекта моделирования выступает целостная элементарная (геотопическая) единица – биогеоценоз, в его фундаментальном определении [7].

Сфера геотопов представляет собой наиболее комплексную и активную часть природной среды, ее функциональное «ядро» [8].

Территориальное разнообразие вещественно-энергетических круговоротов в каждом экорегионе создается самой структурной неоднородностью биогеоценозов. Разработка геоэкологического мониторинга на «ландшафтно-экосистемной» основе – одна из актуальных задач современной экологии в области лесоведения [9].

В соответствии с известными разработками биосфера рассматривается как статистический ансамбль биогеоценозов – слабо взаимодействующих между собой, но внутренне высоко упорядоченных (на основе стабилизирующего отбора) элементарных биохорологических единиц [10].

Это позволяет изучать поведение топогеосистем в различных геоморфологических и эдафических условиях на основе массовой эмпирической информации, при сохранении статистических методов анализа. Тем самым удается представить механизмы биологического круговорота и регуляции углеродного цикла в эмпирико-статистических прогнозных моделях локального географического пространства, что является принципиально новым аспектом решения данной проблемы.

Ландшафтно-экологический прогноз имеет экспериментальный характер. Он разрабатывался как система операций с экологическими (гидротермическими) нишами изучаемых объектов. Эмпирическая имитация ландшафтно-экологических прогнозов реализуется как воспроизведение прогнозируемых сценариев биогеоценологических систем по законам их базовой пространственной организации, с заменой пространственных координат в процедуре прогноза на временные, в соответствии с фундаментальными свойствами эргодичности природной среды.

Весь анализ сопровождался построением соответствующих эмпирико-имитационных моделей. Локальные механизмы глобальных изменений выявлялись через эмпирически установленное отображение фонового биоклиматического тренда катенарным звеном биогеоценозов. Рассматривались региональные структуры локализованной природной зональности, способные моделировать основные направления и масштабы гео(эко-)системных перестроек. Ординационный анализ межкомпонентных и межкомплексных ландшафтных связей был направлен на выявление переходов лесных сообществ в критические состояния, вызывающие структурные перестройки вплоть до зонально-регионального масштаба.

Исходные материалы и методы анализа. Как известно, «... методология традиционных полевых наблюдений ... остается наилучшей для мониторинга постепенной трансформации фитоценозов, включая экзогенные сукцессии» [11].

Объектами исследования послужили лесные экосистемы основного водосбора Волжского бассейна. Используются материалы крупномасштабных (М 1:25–50 000) ландшафтных съемок, проведенных автором в период 1987–1998 гг. на восьми экспериментальных полигонах по специально разработанной методике. В пределах каждого полигона выделялись шесть биогеоценологических групп, расположенных по вектору «литоморфность → гидроморфность»: – от водораздельных элювиальных (Э) и трансэлювиальных (ТЭ) типов местоположений через склоновые транзитные (Т) и трансаккумулятивные (ТА) типы до долинных аккумулятивных (А) и супераккумулятивных (СА). На плоских междуречьях выделялись также элювиально-аккумулятивные (ЭА) типы. На региональном уровне система мезо-местоположений имела аналогичный характер. По

материалам таксации леса на пробных площадях и по специальным таблицам рассчитывались дискретные параметры малого биологического круговорота, а также запасы углерода [12].

Базовые значения запасов углерода разнесены по 52 группам растительных формаций, которые взяты из геоботанических карт в м-бах 1: 2,0–1: 2,5 000 000 [13, 14].

Эти карты создавались примерно в тот же период времени, когда проводились ландшафтные съемки. Используемые геоботанические материалы 35-40-летней давности не потеряли своей актуальности до настоящего времени. Установлено, что за период 1968–2008 гг. в Европейской части России площади земель, покрытых и не покрытых лесом, изменились на 6–8% [15].

Несущественные изменения произошли и в породной структуре лесов. Доля хвойных пород в составе покрытых лесом земель снизилась на 4%, а доля мягколиственных пород увеличилась на 5%. По спутниковым данным, в течение 2000–2015 гг. площадь лесов России сократилась всего на 2,4%, причем у темнохвойных, светлохвойных и лиственных пород это уменьшение составило соответственно 7,8%, 1,9% и 5,8% [16].

Количественная оценка климатогенной трансформации лесных гео(эко-)систем проведена по прогнозным климатическим сценариям двух глобальных моделей из семейства моделей общей циркуляции атмосферы AOGCMs: 1) модели E GISS [17], и 2) модели HadCM3, версия A-2 [18].

Первая модель дает пределы климатических изменений, соответствующие целям Парижского Соглашения– не допустить среднегодовое потепление более чем на 1,5–2,0° к середине нашего столетия, т.е. к сроку удвоения концентрации CO₂ в атмосфере [19].

Однако существующий в настоящее время тренд потепления способен привести к повышению средней температуры на территории России уже к концу XXI столетия на 6–11°, что адекватно климатическому прогнозу по экстремальной модели HadCM3. Такие темпы глобального потепления могут превысить порог выносливости основных лесообразующих пород и привести к распаду на обширных пространствах не только неморальных, но и бореальных лесов [9].

В процедуре эмпирической имитации прогнозных сценариев использовались следующие дискретные базовые характеристики природно-территориальной организации: 1) свойство полизональности локальных геосистем как способа их реакции на глобальные изменения климата; 2) региональные структуры локализованной природной зональности, способные моделировать основные направления и масштабы геосистемных перестроек; 3) локальная эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда на основе бинарной гидро- и термоадаптивной ординации лесных топогеосистем; 4) эмпирическая имитация климатически обусловленных изменений дискретных параметров биологического круговорота на основе их гидротермического ординационного анализа; 5) ландшафтно-экологическое прогнозирование как воспроизведение сценариев биогеоценотических систем по законам их базовой пространственной организации.

Рассмотрим более подробно некоторые разделы прогнозного эмпирико-имитационного моделирования лесных экосистем.

Результаты и их обсуждение

Локальная эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда. В пределах территории с определенными граничными условиями зонально-регионального биоклиматического фона строилась серия факторально-динамических рядов элементарных природных комплексов (биогеоценозов и их групп), расположив члены каждого ряда в порядке усиления (или ослабления) гипертрофированного воздействия соответствующего локального

фактора. В данном случае это были гидротермические ряды топогеосистем, а также их отдельных компонентов, в направлении их возрастающей аридности или, наоборот, гумидности. Каждый такой ряд может быть представлен как некоторый аналог временного ряда геосистем, соответствующего вектору фоновых климатических изменений (тренду) в данном экорегионе. Таким образом, получаем *эргодическую операционную систему*, имеющей, как известно, исключительно важное методическое значение в географических исследованиях. Расположение пространственных состояний объекта в соответствии с их временной последовательностью образует фазовое пространство этого объекта. Исходя из свойств самоподобия эргодической операционной системы, мы заменяем пространственные последовательности на временные и, анализируя векторный ряд топогеосистем, проводим своего рода имитацию локального отображения фонового климатического тренда, на основе чего выявляем реальный спектр возможных направлений функционально-структурных переходов между геосистемами.

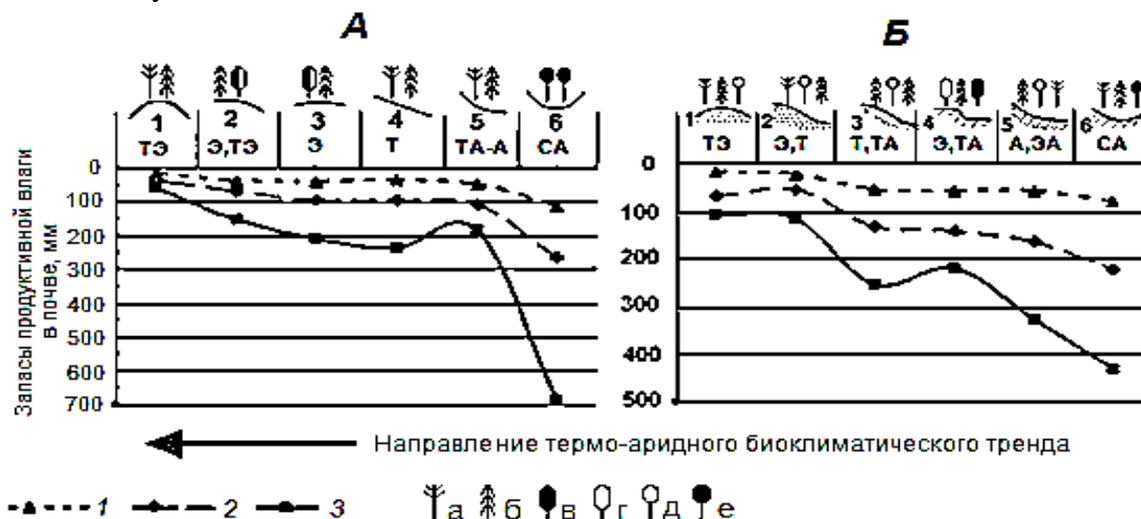


Рисунок 1. Распределение таксономических норм среднеиюльских запасов продуктивной влаги в слоях почвы 0–20 см (1), 0–50 см (2) и 0–100 см (3) различных групп лесных биогеоценозов в системе их катенарной организации, адекватной термоаридному климатическому тренду. Экорегионы Среднего Поволжья: (а) – северная граница широколиственно-лесной подзоны на Приволжской возвышенности (урочище «Зеленый Город»); (б) – южная полоса подтаежной зоны в Низменном Заволжье (Керженский резерват). Типы местоположений: ТЭ – трпнсэлювиальный; Э – элювиальный; Т – транзитный; ТА – трансаккумулятивный; А – аккумулятивный; СА – супераккумулятивный. Древостоидоминанты: 1 – сосна; 2 – ель; 3 – дуб; 4 – липа, вяз; 5 – береза, осина; 6 – ольха

В соответствии с картиной предполагаемых глобальных и региональных климатических изменений, были построены векторные ряды по степени аридизации топоэкосистем, а также их отдельных компонентов для каждой региональной экосистемы. Это касалось не только количественных параметров их состояния, но и самих качественных признаков. На графиках бинарной ординации все состояния рассматриваемых объектов располагались слева направо по оси X (для явления A) и сверху вниз по оси Y (для фактора B) таким образом, чтобы смена самих состояний имела векторный характер и была бы адекватна общей тенденции аридизации локальных ландшафтно-экологических условий (Рисунок 1). Таковыми могут быть, скажем, переходы от переувлажненных днищ малых речных долин к крутым хорошо дренируемым склонам водоразделов, от гидроморфного состояния эдафотопы к ксероморфному, от осоково-сфагновых хвойных или смешанных лесов к мезофитным разнотравным дубравам и далее к сухим сосновым борам-беломошникам и т.п.

Наиболее репрезентативны среднеиюльские запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см (W_{50})_{VII}. Они связаны с коэффициентом атмосферного увлажнения $K_{увл}$ следующим уравнением регрессии (при высоких коэффициентах корреляции R и детерминации R^2):

$$(W_{50})_{VII} = \exp(2.622 + 1.071 K_{увл}); R = 0.89; R^2 = 0.79.$$

По данному уравнению оценивалась степень гидро-эдафической аридизации лесных биогеоценозов.

Региональная система локализованной природной зональности Данное направление ландшафтно-экологического анализа проведено на примере лесных биогеоценозов Приокско-Террасного биосферного резервата, расположенного в «сердцевине» бореального экотона в Среднеокском бассейне [6].

Известно, что ландшафтная мозаика любой территории складывается из ареалов как плакорных локальных гео(эко-)систем, отражающих в наиболее «чистом виде» зонально-региональный фон данной территории и являющихся его представителями, так и экстразональных геотопов, возникших в результате различного рода преломления этого фона под действием местных геоморфологических и почвенно-гидрологических факторов [6].

Обе категории топоэкосистем представлены на территории Приокско-Террасного резервата (Рисунок 2).

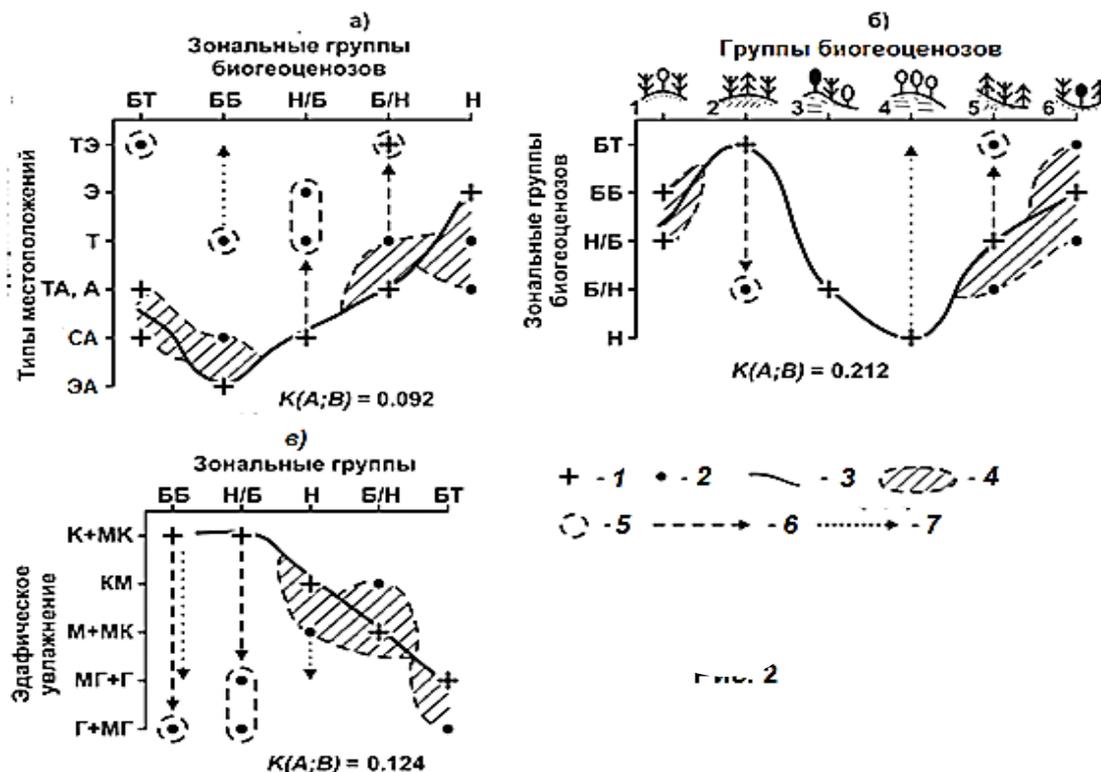


Рис. 2

Рисунок 2. Бинарная ординация зональных представителей Приокско-Террасного биосферного резервата по типам местоположения, группам биогеоценозов и эдафическому увлажнению. Условные обозначения: 1 – экологический доминант; 2 – «размытая» часть экологической ниши; 3 – траектория, соединяющая экологические доминанты; 4 – пространство экологической ниши; 5 – анклав; 6 – направление возможной трансгрессии данного явления от его экологического доминанта; 7 – область спорадического распространения явления в пределах данных градаций фактора. Зональные группы биогеоценозов: БТ – бореальная таежная; ББ – бореальная боровая; Н/Б – неморально-бореальная; Б/Н – бореально-неморальная; Н – неморальная. Экологические группы биогеоценозов: К – ксерофитная; МК – мезо-ксерофитная; М – мезофитная; МГ – мезо-гигрофитная; Г – гигрофитная. Расшифровку условных обозначений биогеоценологических групп см. в тексте. $K(A;B)$ – нормированный коэффициент сопряженности [20]

Группы биогеоценозов (ГБ) 2 и 3 можно отнести к зональным представителям зоны смешанных(хвойно-широколиственных) лесов Среднеокского бассейна. Биогеоценотические группы 1 и, в меньшей степени, 4 характеризуют ксероморфные отклонения от зональной нормы, а группы 5 и 6 дают примеры гидроморфных отклонений.

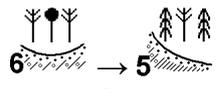
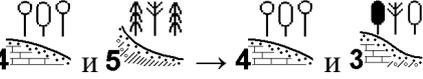
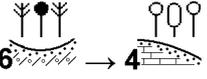
В пределах данного экорегиона был построен гидротермический ряд экстразональных топоэкоцистем (вместе с зональными представителями) в направлении их гумидности или, наоборот, аридности, представляя этот ряд (на основе указанного выше свойства самоподобия операционной системы) как некоторый аналог соответствующих фоновых климатических изменений (тренда). Таким образом, по векторному спектру топологической полизональности появилась возможность представить реальные сценарии реакции локальных геосистем на те или иные сдвиги в региональном климате и наметить соответствующие цепочки местных ландшафтно-экологических переходов.

Принимая положение о том, что все современные лесные сообщества Приокско-Террасного заповедника вторичны и находятся в состояниях различных восстановительных стадий [21], нельзя не видеть и следующего факта. Растительные ассоциации практически всех биогеоценотических групп уже приобрели вполне отчетливые зональные черты, которые, в свою очередь, достаточно тесно связаны с тремя абиотическими факторами–эдификаторами: типом местоположения, глубинами залегания известняков и грунтовых вод, а также с поверхностным увлажнением эдафотопы.

Мезоморфные и ксеро--мезоморфные сосново-липово-дубовые леса (группа биогеоценозов 3) как представители подтаежной зоны Среднеокского бассейна относятся по экологическому доминанту к зонально-климаксовой бореально-неморальной (БН) группе. Мезо-гидроморфные сосново-еловые леса плоских междуречий (группа биогеоценозов 2), а также их крайне гидроморфные варианты в речных долинах и плоских западинах (группа 6) образуют экстразональную группу бореально-таежного (БТ) литоэдафического климакса. Наконец, липово-березовые леса с дубом и осиной (группа биогеоценозов 4) как производные от коренных дубо-липняков, дают противоположный – неморальный (Н) «полюс» экстразонального литоэдафического климакса, с ксеро-мезоморфным эдафическим увлажнением.

Региональная система локальной зональности в заповеднике отличается высокой контрастностью даже на плакорных типах местоположений (Рисунок 2 а, б). Леса бореальная таежной группы соседствуют с зональными представителями неморальнолесной подзоны, а также с сообществами подтаежного типа, при почти одинаковом механическом составе почвообразующих пород. Это указывает на значительное перекрытие их гидро-термических экологических ниш, которое должно вызвать их обостренную взаимную конкуренцию и как следствие – высокую потенциальную способность к взаимным функционально-структурным переходам при том или ином климатическом тренде.

По приведенным моделям бинарной ординации проведены прогнозные оценки возможных изменений биогеоценотической структуры Приокско-Террасного резервата в условиях современной климатической аридизации региона. Заданы два скачка изменения глубины залегания грунтовых вод в СА и ЭА местоположениях: 1) $\Delta ГЗГВ = 0 \rightarrow 0,5$ м и 2) $\Delta ГЗГВ = 0,5 \rightarrow 1$ м. Будет развиваться прогрессирующий процесс улучшения дренажа, снижения влажности и последующего иссушения почвы. На участки с высокотрофным суглинистым субстратом будут трансгрессировать суббореальные фитоценозы: липняки с

осиной, затем дубняки с липой. Сначала ожидаются следующие переходы: ; . В последующем возможны переходы:  и .

При этом, сосново-широколиственные леса (группа биогеоценозов 3) будут весьма устойчивы в своих современных ареалах, они почти не отреагируют на указанные изменения ГЗГВ, благодаря широкому диапазону своей гидро-эдафической ниши. Вместе с тем, они могут активно захватывать местоположения биогеоценозов группы 5, а затем и 6, расширяя свои ареалы.

Идеология и сценарии прогнозного ландшафтно-экологического моделирования. Ландшафтно-экологический прогноз как центральное звено геосистемного мониторинга имеет *экспериментальный характер*. Он представлен в качестве системы операций с экологическими (гидро-термическими) нишами изучаемых объектов. Эмпирическая имитация ландшафтно-экологических прогнозов реализуется путем воспроизведения ожидаемых сценариев биогеоценологических систем по законам их базовой пространственной организации, с заменой в процедуре прогноза пространственных координат на временные.

Основной принцип ландшафтно-экологического прогнозирования гласит: климатически обусловленное функциональное преобразование одной гео(эко-)системы в другую 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 систем по данному геофизическому признаку [6]. Взаимное приспособление популяций и их совместное существование означают значительное перекрытие их экологических ниш.

Обостренная конкуренция между популяциями неизбежно приводит к трансформации самого сообщества в том направлении, которое отвечает новому состоянию среды, согласно закону конкурентного исключения Гаузе [22].

Адаптация к новым условиям среды во многих случаях приводит к эволюционной дивергенции сообществ и к соответствующему повышению пространственного био- и георазнообразия. Согласно этому правилу, 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 координатам этого пространства (климатическая ниша объекта *B* в данном случае принимается неизменной). В свою очередь, объект *B* трансформируется в объект *C*, с соответствующим смещением природных границ и т.д. В конечном итоге получаем картину предполагаемого сдвига ландшафтной структуры всей рассматриваемой территории в связи с изменениями данной характеристики климата во временном масштабе, соразмерном с характерным временем природных комплексов данного ранга. На Рисунке 3 приведены результаты расчетов прогнозных ландшафтно-экологических сценариев для двух экорегионов Среднего Поволжья (южной подтайги и типичной лесостепи) по умеренной и экстремальной климатическим моделям (см. выше) [6].

К указанным прогнозным срокам в целом для обоих экорегионов коэффициент атмосферного увлажнения по модели E GISS уменьшается на 0.12–0.16, а по модели HadCM3 – на 0.61–0.78. При умеренном термоаридном сигнале лесные биогеоценозы почти всей катенарной системы на 55–80% остаются в своем базовом функционировании, а вероятности межфациальных переходов не превышают 25–35% (Рисунок 3 *a*). В районе Приокско-Террасного заповедника заболоченные супераквальные хвойно-мелколиственные леса могут не более чем 15% замещаться мезо-гидроморфными элювиальными ельниками и сосняками.

Последние, в свою очередь, с такой же малой скоростью перейдут в состояние трансэлювиальных ксероморфных березово-сосновых лесов.

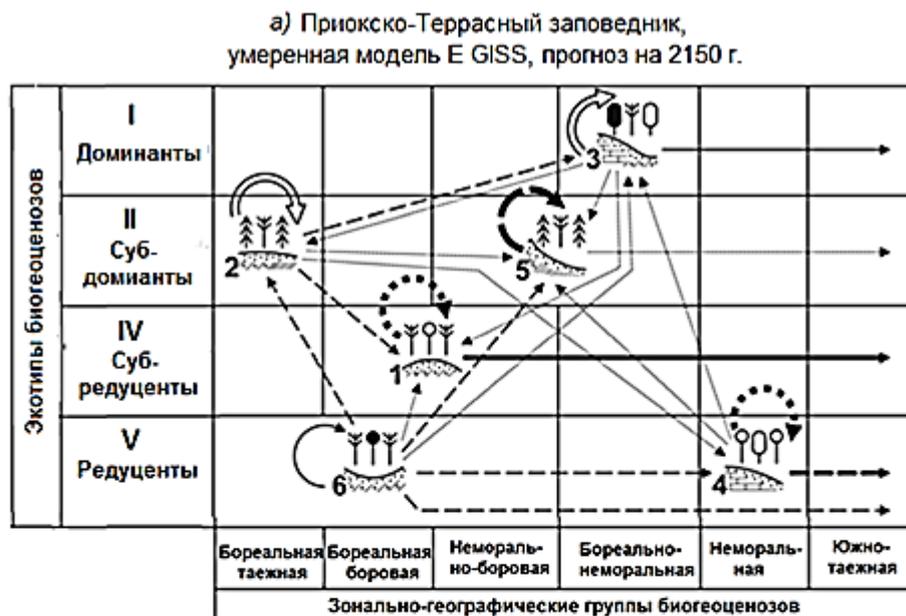


Рисунок 3. Региональные орграфы взаимных функциональных переходов (согласно двум прогнозно-климатическим моделям) групп биогеоценозов, имеющих различные зональные признаки и находящихся на соответствующих уровнях базового функционирования, Вероятности переходов: 1 – 0,10 и менее; 2 – 0,11–0,20; 3 – 0,21–0,30; 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

Экстремальный климатический сигнал полностью нарушает функциональную устойчивость всех биогеоценологических групп (Рисунок 3 б). В Присурье (Национальном природном парке «Чаваш Вармане») боровые сосняки с елью и сосново-широколиственные леса (группы фаций 1 и 2) должны трансформируются (соответственно, на 80–90% и на 60–70%) сначала в южную лесостепь, а затем и в северную степь. В свою очередь, сами лесные сообщества этой плеяды служат прообразами будущих состояний практически всех остальных фациальных групп, в том числе плакорных дубо-липняков соседних возвышенных равнин.

При прогнозных оценках на первые несколько десятков лет с точки зрения характерных времен объектов первостепенное внимание должно быть уделено не структурной эволюции гео(эко-)систем, а направленной смене их функционирования, т.е. функциональной релаксации [5, 6].

Речь идет, прежде всего, об изменениях скорости малого биологического круговорота и о переходе экосистемы на новый уровень сбалансированности продукционной и детритной ветвей метаболизма. Этот процесс по своей продолжительности достаточно адекватен общему сдвигу ландшафтно-экологических условий. Таким образом, приоритетным объектом ландшафтно-экологического прогнозирования является функциональная релаксация гео(эко-)систем как их первоочередная реакция на внешнее воздействие.

Заключение

Эмпирико-статистические модели как модели статичные имеют свои недостатки, один из которых – неопределенность получаемых результатов во времени [4]. Они дают представление о тех конечных равновесных состояниях, к которым будут стремиться данные природные комплексы (в соответствии с их временами релаксации). Впрочем, в представленных нами моделях могут быть отражены и динамические свойства природной среды. Согласно теории конечных автоматов, прогнозируемую траекторию структурных преобразований гео(эко-)системы можно интерпретировать как серию последовательных смен (этапов) ее функциональных состояний, т.е. дискретными временными тактами, что позволяет раскрыть определенные закономерности ее изменений во времени [23]. Обратим внимание также на определенную ограниченность эмпирико-имитационного метода ландшафтно-экологического прогнозирования, основанного, как уже говори-лось, на фундаментальном свойстве эргодичности природной среды. Суть этих ограниче-ний состоит в том, что прогноз может быть реальным только на период сохранения равно-весных или, по крайней мере, стационарных процессов [24]. Адекватность моделей существенно снизится, если в течение прогнозного периода роль экологических факторов станет кардинально меняться. В этом случае прогнозируемая гео(эко-)система, будучи изначально линейной, перейдет в категорию нелинейных систем, с непропорциональ-ностью их отклика на ту или иную величину возмущающего сигнала [25]. Для лесной зоны Волжского бассейна подобная ситуация сложится, по-видимому, уже к 2050 году, когда состояние атмосферы выйдет за рамки современной межгодовой изменчивости параметров ее состояния [5]. Модно полагать, что указанные ограничения эргодичной операционной системы обусловлены, согласно [26], существенной обособленностью трех основных направлений ландшафтного синтеза – структурного, функционального и эволюционного. Эти ограничения могут быть в значительной мере преодолены, если, на каждом дискретном шаге прогнозирования принять, по [24], траекторию предполагаемых функциональных изменений гео(эко-)системы стационарным неравновесным процессом, который обладает свойствами обратимости. При внешнем возмущении система переходит из состояния равновесия в неравновесный стационарный режим. При этом, слияние прежнего устойчивого равновесия с неустойчивым стационарным режимом вызывает определенный скачкообразный переход к новому режиму [27]. Таким образом, каждый новый шаг прогнозируемой траектории представляет собой скачок функциональных изменений гео(эко-)системы, выраженный в большей или меньшей степени.

Список литературы:

1. Розенберг Г. С. Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984. 265 с.

2. Чертов О. Г., Комаров А. С., Надпорожская М. А. ROMUL – модель динамики органического вещества в лесных и торфяных почвах и ее программная реализация // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. С. 62–69.
3. Bonan G. B., Pollard D., Thompson S. L. Effect of boreal forest vegetation on global climate warming // Nature. 1992. №359. P. 716–718.
4. Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H. Vegetation Response to Climate Change in the Alps: Modeling Studies // Views from the Alps: regional perspectives on climate change. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1998. P. 309–350.
5. Коломыц Э. Г. Экспериментальная географическая экология. Записки географо-натуралиста. М.: КМК, 2018. 716 с.
6. Коломыц Э. Г. Мониторинг устойчивого развития лесных экосистем в меняющемся климате. М.: ИНФРА-М, 2024. 547 с.
7. Сукачев В. Н. Избранные труды. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. 418 с.
8. Сочава В. Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах // Топологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 3–86.
9. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Краксер Ф., Онучин А. А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. 2017. №6. С. 3–25.
10. Горшков В. В., Горшков В. Г., Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С., Макарьева А. М. Биотическая регуляция окружающей среды // Экология. 1999. № 2. С. 105–113.
11. Израэль Ю. А., Семенов С. М., Хачатуров М. А. Биоклиматологические аспекты комплексного глобального мониторинга // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1993. Т. XV. Л.: Гидрометеиздат. С. 8–20.
12. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильссон С., Болуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М., 2008. 885 с.
13. Грибова С. А., Исаченко Т. И., Лавренко Е. М. Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 429 с.
14. Котова Т. В. Растительность Европейской части СССР и Кавказа. М: 1:2 000 000. М.: ГУГК, 1987. 4 л.
15. Исаев А. С. Разнообразие и динамика лесных экосистем России. Кн. 1. М.: КМК. 2012. 460 с.
16. Барталев С. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Уваров И. А. Карта растительного покрова России. М.: ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН. 2010.
17. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E // Climate Dynamics. 2007. V. 29. P. 661–696.
18. Pope V. D., Gallani M. L., Rowntree P. R., Stratton R. A. The impact of new physical parametrizations in Hadley Centre climate model – HadCM3 // Climate Dynamics. 2000. V. 16. P. 123-146.
19. Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 2015. 19 p. <http://unfccc.int/resource/does/2015/scop21/eng/109r01.pdf>
20. Пузаченко Ю. Г., Скулкин В. С. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.
21. Заугольнова Л. Б. Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России. М., 2000. 196 с.

22. Розенберг Г. С., Мозговой Д. П., Гелашвили Д. Б. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии. Самара, 1999. 396 с.
23. Девдариани А. С. Эволюционные ряды физико-географических явлений и конечные автоматы // Известия РАН. Серия географическая. 1969. №2. С. 115-120.
24. Пузаченко Ю. Г. Методологические основы географического прогноза и охраны среды. М.: Изд-во УРАО, 1998. 212 с.
25. Зейдис И. М., Кружалин В. И., Симонов Ю. Г. Общие свойства динамики геосистем // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2001. №4. С. 3–8.
26. Дьяконов К. Н. Взаимодействие структурного, эволюционного и функционального направлений в ландшафтных исследованиях // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2002. №1. С. 13–21.
27. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.

References:

1. Rozenberg, G. S. (1984). *Modeli v fitotsenologii*. Moscow. (in Russian).
2. Chertov, O. G., Komarov, A. S., & Nadporozhskaya, M. A. (2007). ROMUL – model' dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnykh i torfyanykh pochvkh i ee programmaya realizatsiya. In *Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnykh ekosistemakh*, Moscow, 62–69. (in Russian).
3. Bonan, G. B., Pollard, D., & Thompson, S. L. (1992). Effect of boreal forest vegetation on global climate warming. *Nature*, (359), 716–718.
4. Lischke, H., Guisan, A., Fischlin, A., & Bugmann, H. (1998). Vegetation Response to Climate Change in the Alps: Modeling Studies. *Views from the Alps: regional perspectives on climate change*. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 309–350.
5. Kolomyts, E. G. (2018). Eksperimental'naya geograficheskaya ekologiya. *Zapiski geografa-naturalista*. Moscow. (in Russian).
6. Kolomyts, E. G. (2024). Monitoring ustoichivogo razvitiya lesnykh ekosistem v menyayushchemsya klimate. Moscow. (in Russian).
7. Sukachev, V. N. (1972). *Izbrannye trudy*. 1. Osnovy lesnoi tipologii i biogeotsenologii. Leningrad. (in Russian).
8. Sochava, V. B. (1974). Geotopologiya kak razdel ucheniya o geosistemakh // *Topologicheskie aspekty ucheniya o geosistemakh*. Novosibirsk, 3–86. (in Russian).
9. Shvidenko, A. Z., Shchepachenko, D. G., Kraksner, F., & Onuchin, A. A. (2017). Perekhod k ustoichivomu upravleniyu lesami Rossii: teoretiko-metodicheskie predposylki. *Sibirskii lesnoi zhurnal*, (6), 3–25. (in Russian).
10. Gorshkov, V. V., Gorshkov, V. G., Danilov-Danil'yan, V. I., Losev, K. S., & Makar'eva, A. M. (1999). Bioticheskaya regulyatsiya okruzhayushchei sredy. *Ekologiya*, (2), 105–113. (in Russian).
11. Izrael', Yu. A., Semenov, S. M., & Khachaturov, M. A. (1993). Bioklimatologicheskie aspekty kompleksnogo global'nogo monitoringa. In *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 15, Leningrad, 8-20. (in Russian).
12. Shvidenko, A. Z., Shchepachenko, D. G., Nil'sson, S., & Bolui, Yu. I. (2008). *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii (normativno-spravochnye materialy)*. Moscow. (in Russian).
13. Gribova, S. A., Isachenko, T. I., & Lavrenko, E. M. (1980). *Rastitel'nost' Evropeiskoi chasti SSSR*. Moscow. (in Russian).

14. Kotova, T. V. (1987). Rastitel'nost' Evropeiskoi chasti SSSR i Kavkaza. M: 1:2 000 000. Moscow. (in Russian).
15. Isaev, A. S. (2012). Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii. Kn. 1. Moscow. (in Russian).
16. Bartalev, S. A., Ershov, D. V., Isaev, A. S., Lupyan, E. A., & Uvarov, I. A. (2010). Karta rastitel'nogo pokrova Rossii. Moscow. (in Russian).
17. Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R. (2007). Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E. *Climate Dynamics*, 29, 661–696.
18. Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree P. R., & Stratton R. A. (2000). The impact of new physical parametrizations in Hadley Centre climate model – HadCM3. *Climate Dynamics*, 16, 123–146.
- 19 Paris Agreement (2015). Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 19 p. <http://unfccc.int/resource/does/2015/scop21/eng/109r01.pdf>
20. Puzachenko, Yu. G., & Skulkin, V. S. (1981). Struktura rastitel'nosti lesoi zony SSSR. Sistemnyi analiz. Moscow. (in Russian).
21. Zaugol'nova, L. B. (2000). Otsenka i sokhranenie bioraznoobraziya lesnogo pokrova v zapovednikakh Evropeiskoi Rossii. Moscow. (in Russian).
22. Rozenberg, G. S., Mozgovoi, D. P., & Gelashvili, D. B. (1999). Ekologiya. Elementy teoreticheskikh konstruktsii sovremennoi ekologii. Samara. (in Russian).
23. Devdariani, A. S. (1969). Evolyutsionnye ryady fiziko-geograficheskikh yavlenii i konechnye avtomaty. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, (2), 115-120. (in Russian).
24. Puzachenko, Yu. G. (1998). Metodologicheskie osnovy geograficheskogo prognoza i okhrany sredy. Moscow. (in Russian).
25. Zeidis, I. M., Kruzhalin, V. I., & Simonov, Yu. G. (2001). Obshchie svoistva dinamiki geosystem. *Vestnik MGU. Ser. 5. Geografiya*, (4), 3–8. (in Russian).
26. D'yakonov, K. N. (2002). Vzaimodeistvie strukturnogo, evolyutsionnogo i funktsional'nogo napravlenii v landshaftnykh issledovaniyakh. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, (1), 13–21. (in Russian).
27. Svirezhev, Yu. M., & Logofet, D. O. (1978). Ustoichivost' biologicheskikh soobshchestv. Moscow. (in Russian).

Поступила в редакцию
05.01.2026 г.

Принята к публикации
11.01.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Коломыц Э. Г. Эмпирико-имитационный метод прогнозного моделирования лесных геосистем при глобальных изменениях климата // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №3. С. 68-80. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/07>

Cite as (APA):

Kolomyts, E. (2026). Empirical-Imitational Method for Predictive Modeling of Forest Geosystems under Global Climate Change. *Bulletin of Science and Practice*, 12(3), 68-80. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/07>