

===== **МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ** =====  
**ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ**

УДК 57.574 + 91.911.913.929

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
ПРИ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА (ИТОГИ НАУЧНОГО ПОИСКА)**

© 2026 г. Э.Г. Коломыц

*Пуцинский научный центр РАН, Институт фундаментальных проблем биологии  
Россия, 142290, г. Пуцино, ул. Институтская, д. 1. E-mail: egk2000@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.02.2026. После доработки 01.03.2026. Принята к публикации 02.03.2026.

Рассмотрены перспективы реализации полной триады геоэкологического мониторинга: «наблюдение (оценка состояния) – контроль (прогнозирование) – управление (адаптация, регулирование)». Предложены концептуальные положения эмпирико-имитационного метода ландшафтно-экологического прогнозирования лесных экосистем, раскрывающего локальные и региональные механизмы их глобальных изменений. Обоснованы пути разработки новой прогнозной геоэкологической концепции «Глобальные изменения на локальном уровне» с выявлением этих изменений через эмпирически установленное отображение фонового биоклиматического тренда катенарной системой лесных биогеоценозов. В этом состоит новизна разработанной автором прогностической концепции. Ординационный анализ ландшафтных связей направлен на выявление переходов лесных сообществ в критические состояния по основным дискретным параметрам биологического круговорота. Ландшафтно-экологический прогноз представлен системой операций с экологическими (гидротермическими) нишами изучаемых объектов. Эмпирико-имитационное прогнозное моделирование описано как воспроизведение будущих сценариев биогеоценологических систем по законам их базовой пространственной организации. Приводится разработанная автором методика количественной оценки устойчивости лесных экосистем. Механизмы адаптации лесных экосистем к глобальным климатическим сигналам рассматриваются через призму их функциональной устойчивости к воздействию этих сигналов. Описаны экологические ресурсы лесного покрова в биотической регуляции углеродного цикла, направленной на смягчения глобального потепления, а также в обеспечении перехода к адаптивному лесному хозяйству

*Ключевые слова:* глобальное потепление, лесные гео(эко)системы, геоэкологический мониторинг, эмпирико-имитационное прогнозное моделирование, устойчивость лесных экосистем, количественные методы экологического анализа, углеродный цикл, экологические ресурсы лесов, смягчение глобального потепления.

**DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-93-116**

**EDN: VJGNPO**

Современная биосфера представляет собой высокоррелированную, саморегулирующуюся систему, которая обеспечивает устойчивость слагающих ее элементов, а при нарушении устойчивости «гасит» нарушение, либо начинает разрушаться сама, что приводит к экологическому кризису. Один из таких глобальных кризисов назревает в настоящее время в связи с негативными изменениями климата, которые обусловлены антропогенным воздействием на химический состав атмосферы, в частности, на концентрацию в ней углекислого газа (Будыко, 1980).

Экологическая безопасность крупнейших по уровню развития экономических регионов России связана в значительной мере с проблемой сохранения и воспроизводства лесных ресурсов, прежде всего, на юге бореального пояса и на севере пояса суббореального, т.е. в критических условиях зональных переходов от леса к степи. Особенно актуальной данная проблема становится в условиях современного глобального потепления, с его весьма

разнообразными и подчас труднопредсказуемыми экологическими последствиями (Houghton et al., 2002). Лесные экосистемы – наиболее мощный регулятор и стабилизатор природных биогеохимических круговоротов (Сукачев, 1972), в т.ч. углеродного цикла и тесно связанного с ним температурного режима атмосферы (Тарко, 2005). Леса России и Канады поглощают около 1/3 массы глобального углерода, выбрасываемой индустриальными источниками и в результате землепользования (Лосев, 2001). «Лес справедливо рассматривается как одно из наиболее действенных средств смягчения неблагоприятных последствий изменения климата» (Швиденко и др., 2017, с. 17).

Однако при глобальных изменениях климата многие лесные экосистемы могут стать чистыми источниками выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу, поэтому необходимо оценить их обратные связи с климатом (Stinson et al., 2011), в т.ч. климатическую адаптацию лесного покрова (Замолотчиков и др., 2014). Это должно составлять идеологическую основу адаптивного лесного хозяйства.

Таким образом, стратегической целью геоэкологического мониторинга лесов является раскрытие экологического потенциала перехода к адаптивному лесному хозяйству на основе механизмов устойчивости лесных сообществ в условиях современного глобального потепления. Геоэкологический мониторинг становится сквозным технологическим приемом выявления ключевых показателей отклика лесных сообществ на климатические сигналы, а также установления пороговых значений этих сигналов, которые превышают адаптационные способности лесобразующих пород.

### **Проблемы комплексной триады геоэкологического мониторинга**

Основное содержание геоэкологического мониторинга составляют: 1) комплексный анализ состояния гео(эко)систем как целостных природных образований и как дифференциальных структурных единиц биосферы; 2) оценка их устойчивости к внешним воздействиям, а также прогнозирование их антропогенных изменений. Выделение антропогенной составляющей в глобальных изменениях окружающей среды включено в стратегию сохранения ее устойчивости.

Конечной научно-практической целью изучения механизмов устойчивости лесных экосистем при изменениях климата является создание теоретических, методических и фактических предпосылок для раскрытия экологического потенциала лесов, способного обеспечить переход к адаптивному лесному хозяйству. Задача решается путем реализации полной триады геосистемного мониторинга лесов в условиях современного глобального потепления в форме базисных и прогностических экологических экспериментов, с построением аналитических и картографических эмпирико-статистических моделей.

Стратегия исследования базируется на идейных и научно-методических положениях выдвинутой автором концепции геосистемного мониторинга как ландшафтно-экологической поисковой системы «Глобальные изменения на локальном уровне» (Коломыц, 2008, 2018, 2020, 2025). Пространственный функциональный мониторинг лесов проводился на основе эмпирически установленных локальных и региональных ландшафтных связей, которые рассматриваются как механизмы метаболического ответа лесных биогеосистем на климатические сигналы, в т.ч. на современное глобальное потепление. В этом состоит экспериментальный характер самого мониторингового исследования.

В таком аспекте проблема геосистемного мониторинга оставалась до последнего времени слабо разработанной, т.к., во-первых, отсутствовала необходимая фактологическая база, а, во-вторых, не была создана достаточно строгая методология локального и регионального ландшафтно-экологического прогнозирования как ключевого звена мониторинга. В научно-методических поисках автора достаточно подробно освещены пути решения этих проблем

(Коломыц, 2025). На примере бореального экотона Волжского бассейна обоснованы методы определения тех параметров структурно-функциональной организации лесных экосистем юга бореального пояса и севера пояса суббореального, которые наиболее чувствительны к глобальным климатическим изменениям и которые, следовательно, могут быть использованы для их локального и регионального геосистемного мониторинга.

В последние десятилетия активно изучаются возможные функциональные и структурные преобразования природных экосистем и их компонентов под влиянием современного глобального потепления как актуальной экологической проблемы человечества. Значительный прогресс был достигнут в разработке комплексных глобальных аспектов мониторинга для обнаружения изменений окружающей среды (Мохов, 2006; Franklin et al., 2017). Однако экстраполяция методов глобального мониторинга системы «океан–атмосфера–континент» на региональный и особенно локальный уровни сталкивается со значительными фактическими и методологическими трудностями. Очевидно, здесь необходимо разрабатывать свои независимые методы мониторинга.

Согласно концепции Ю.А. Израэля (1974) и И.П. Герасимова (1975), вся система контроля за окружающей средой может быть обобщена следующей формулой: «наблюдение (оценка состояния) – контроль (прогнозирование) – управление (адаптация, обратная связь, регулирование)». С самого начала Ю.А. Израэль (1984, с. 11-12) подчеркивал, что мониторинг в полном объеме должен включать не только «слежение» (повторные наблюдения), но «...также оценку и прогноз состояния окружающей среды... и контроль качества окружающей среды», т.е. реализацию всей его операционной триады.

К сожалению, это важнейшее методическое положение учения о геоэкологическом мониторинге выполняется редко, особенно в региональных и локальных экологических исследованиях, хотя термин «мониторинг» упоминается каждый раз. В отечественной и зарубежной литературе по мониторингу подавляющее большинство работ ограничивается анализом исходного (базового) состояния природных и антропогенных экосистем и в лучшем случае выявлением причинно-следственных связей между динамикой почвенно-биотических компонентов и изменением климата как основы для прогнозирования состояния окружающей среды (Kljun et al., 2007; Beets et al., 2011).

Диапазон подобных исследований в России весьма значителен. Проведены многочисленные эксперименты по изучению влияния современных метеорологических и климатических условий на состояние, фенологию и тенденции развития растительных сообществ в разных регионах Русской равнины, Среднего и Южного Урала (Голубятников и др., 2005; Гордиенко, 2017).

Весьма информативными оказались работы второго этапа мониторинга – по региональному и планетарному эколого-географическому прогнозу, а также по прогнозированию углеродного баланса лесов. Здесь можно отметить прогнозные сценарии климатогенных изменений зональных и региональных экосистем Русской равнины, Западной и Средней Сибири (Израэль, 1984; Коломыц, 2018). На основе климатических сценариев по прогнозным моделям ЕСНАМ4/ОРУС3 и HadCM3 оценены возможные изменения продуктивности растительности России в XXI веке (Голубятников и др., 2005). Разработаны прогнозные аналитические и картографические модели углеродного баланса лесов страны на основе комплексной наземной и спутниковой информации (Швиденко и др., 2017).

Наконец, обратимся к третьему и заключительному этапу мониторинга – управлению (регулированию). Этот этап пока находится в состоянии предлагаемых определений, концептуальных гипотез и научно-методических программ. Прежде всего, следует отметить концепцию «климатической геоинженерии» как целенаправленного изменения параметров климатической системы с целью предотвращения катастрофических экологических последствий глобального потепления (Израэль, Рябошапка, 2011). Такие изменения могут

быть вызваны и вызывались на протяжении всей истории биосферы лесным покровом посредством регулирования углеродного цикла (Горшков, 1995). Глобальные прогнозы роли лесного покрова в регулировании парникового эффекта атмосферы представлены в мелкомасштабных сценариях углеродного бюджета циркумполярных бореальных лесов Евразии и Северной Америки на основе корреляционных связей их биомов с диапазонами температур и осадков (Gauthier et al., 2015).

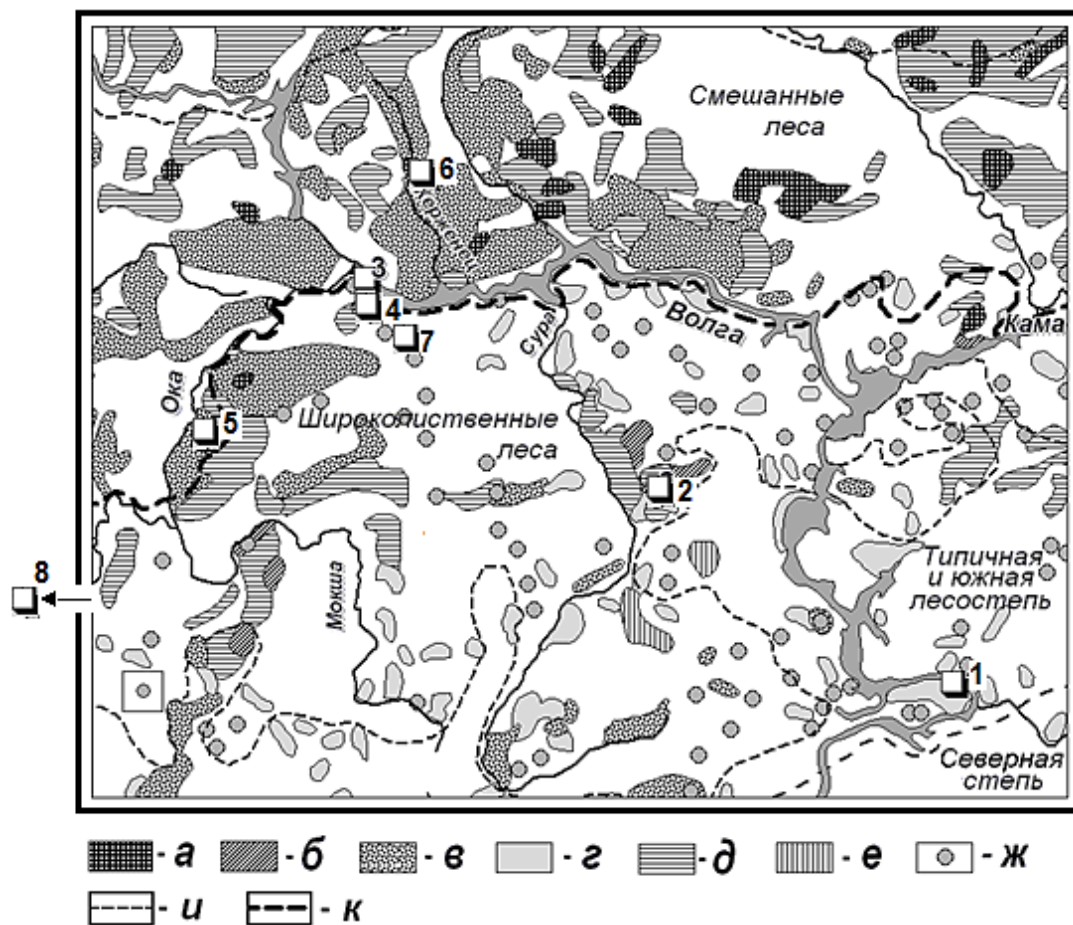
Итак, каждая из 3 триад геоэкологического мониторинга уже получила определенную научную и методическую разработку, однако интеграция всех этих результатов в единую оперативную систему мониторинга оставалась весьма проблематичной. Рамочная идея полной триады геоэкологического мониторинга, провозглашенная более 50 лет назад, до сих пор не была реализована.

Решение данной задачи было включено автором в программу его многолетних ландшафтно-экологических исследований (Коломыц, 2008), которые были проведены в бассейнах Средней Волги и Оки. Основной фактический материал был собран в 1987-1998 гг. на 8 крупномасштабных экспериментальных полигонах (рис. 1). Осуществлялся полный цикл климатогенного мониторинга лесов «наблюдение – контроль – управление» на примере конкретного экорегиона с разработкой единой системы моделирования лесных природных комплексов в настоящем и будущем и с изучением соответствующих прямых и обратных связей лесов с климатом. На этой основе выявлен экологический потенциал бореальных и суббореальных лесов, обеспечивающий переход лесного хозяйства на адаптивную стратегию.

Первый шаг к познанию механизмов климатогенной динамики лесных экосистем осуществлен через методическую конструкцию с рабочим названием «Эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда экосистемами локального уровня». На примере экспериментальных полигонов, характеризующих на Русской равнине зональные переходы от леса к степи (рис. 1), были выявлены закономерности преломления зонально-регионального биоклиматического фона местными геоморфологическими и гидроэдафическими факторами. Локальные механизмы глобальных изменений вскрываются через эмпирически установленное отображение фонового биоклиматического тренда катенарной системой биогеоценозов (табл. 1).

Установлено, что в результате такого преломления формируются региональные системы локализованной природной зональности, состоящие из векторных рядов плакорных (элювиальных) биогеоценозов, которые отражают зонально-региональный фон данной территории, и экстразональных топоэкосистем (трансэлювиальных, супераквальных) – как представителей других зональных типов географической среды, нередко весьма удаленных. Эти пространственно упорядоченные системы адекватны вектору прогнозируемых изменений климата и поэтому способны имитировать основные направления и масштабы экосистемных перестроек (рис. 2), создавая тем самым эмпирическую основу для прогнозных построений. Ординационный анализ межкомпонентных и межкомплексных ландшафтных связей был направлен на выявление переходов лесных сообществ в критические состояния, которые вызывают их структурные перестройки вплоть до зонально-регионального масштаба.

Локальный и региональный ландшафтно-экологический прогноз как центральное звено мониторинга имеет экспериментальный характер. Он описан в виде системы операций с экологическими (гидротермическими) нишами изучаемых объектов. Разработанные прогнозные сценарии функциональных преобразований топоэкосистем базируются на климатогенной динамике их гидроэдафотопов (рис. 3), которые служат основным передаточным звеном трансформации гидротермических сигналов с глобального уровня на локальный.



**Рис. 1.** Растительный покров Среднего Поволжья (Котова, 1987) и схема расположения экспериментальных полигонов. *Условные обозначения.* Леса: а – еловые, пихтово-еловые и черноольховые с елью, б – широколиственно-сосновые, местами с елью, в – сосновые (боры) и елово-сосновые (суборы), г – широколиственные, д – березово-осиновые и березово-липовые, е – березовые и сосново-березовые. Остальные обозначения: ж – внемасштабные ареалы широколиственных лесов, и – границы природных зон и подзон, к – Главный ландшафтный рубеж Русской равнины. Экспериментальные полигоны: 1 – Жигули (Самарская Лука), 2 – Присурье («Чаваш Вармане»), 3 – Щелоковский Хутор, 4 – Зеленый Город, 5 – Выкса, 6 – Керженец, 7 – Кудьма, 8 – Приокско-Террасный биосферный резерват.

**Fig. 1.** Vegetation cover of the Middle Volga Region (Kotova, 1987) and the layout of the experimental sites. *Legend.* Forests: a – spruce, fir-spruce, and black alder with spruce, b – broadleaf-pine, in places with spruce, c – pine and spruce-pine (subori), g – broadleaf, d – birch-aspen and birch-linden, e – birch and pine-birch. Other: g – non-scale areas of broadleaf forests, i – boundaries of natural zones and subzones, k – Main landscape boundary of the Russian Plain. Experimental sites: 1 – Zhiguli (Samarskaya Luka), 2 – Prisurye (“Chavash Varmane”), 3 – Shchelokovsky Khutor, 4 – Zeleny Gorod, 5 – Vyksa, 6 – Kerzhenets, 7 – Kudma, 8 – Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve.

### Эмпирико-имитационный метод ландшафтно-экологического прогнозирования

























Необходимо отметить принципиальные отличия излагаемых здесь методов моделирования в мониторинге от большинства методов в упомянутых выше исследованиях. Эти исследования, как правило, основаны на континуальном (динамическом) имитационном моделировании природной среды (Тарко, 2005; Gauthier et al., 2025; Franklin et al., 2017).

**Таблица 1.** Группы биогеоценозов (ландшафтных фаций) в некоторых экорегионах Волжского бассейна. **Table 1.** Biogeocoenoses groups (i.e., landscape facies) in some eco-regions of the Volga River Basin.

<b>Зональная принадлежность (экспериментальный полигон)</b>			
<b>Подтаежное Низменное Заволжье (Керженец, биосферный резерват «Нижегородское Заволжье»)</b>		<b>Юг подтаежной зоны в Среднеокском бассейне (Приокско-Террасный биосферный резерват)</b>	
Ксероморфные сосняки с елью на вершинах и склонах песчаных гряд	 1 ТЭ	Ксероморфные и мезо-ксероморфные сосняки, с березой и липой на песчаных грядках	 1 ТЭ
Мезо-ксероморфные сосняки с березой и елью на междуречьях песчаной полого-волнистой равнины	 2 Э-ТА	Мезо-гидроморфные еловые и сосново-еловые леса плоских междуречий на моренных отложениях	 2 Э
Мезоморфные еловые и елово-березовые леса возвышенных междуречий моренно-зандровой равнины	 3 Т	Ксеро-мезоморфные сосново-липово-дубовые леса на суглинистых водоразделах и склонах	 3 Э-ТЭ
Мезоморфные елово-дубово-липовые леса на возвышенной высокой пойме и надпойменных террасах	 4 Э-ТА	Мезоморфные и мезо-ксероморфные липово-березовые леса верхних и средних частей склонов	 4 Т
Мезо-гидроморфные хвойные и мелколиственные леса западин моренно-зандровой равнины	 5 А	Мезо-гидроморфные ельники и сосняки средних и нижних частей суглинистых склонов	 5 Т-ТА
Гидроморфные сосняки, ельники и ольшаники пойменных западин и долин малых рек	 6 СА	Гидроморфные сосняки, ельники, березняки и черноольшаники в речных долинах и западинах	 6 ЭА
<b>Широколиственнолесная подзона Приволжской возвышенности (урочище Зеленый Город)</b>		<b>Типичная лесостепь Приволжской возвышенности (Природный национальный парк «Чаваш Вармане» – Присурье)</b>	
Ксероморфные сосновые боры и субори песчаных бугристых водоразделов	 1 ТЭ	Мезо-ксероморфные сосняки и елово-сосновые леса плоских водоразделов и выпуклых склонов песчаной равнины	 1 ТЭ
Мезоморфные ельники и елово-липовые дубняки плоских междуречий и прилегающих склонов	 2 ТЭ	Мезоморфные сосново-широколиственные и осиновые леса плоских водоразделов и склонов моренной равнины	 2 ТЭ
Ксеро-мезоморфные плакорные елово-липовые дубравы и березняки на водоразделах	 3 Э	Мезоморфные дубово-липовые и осиновые леса полого наклонных суглинистых водоразделов (плакоров)	 3 Э

## Продолжение таблицы 1.

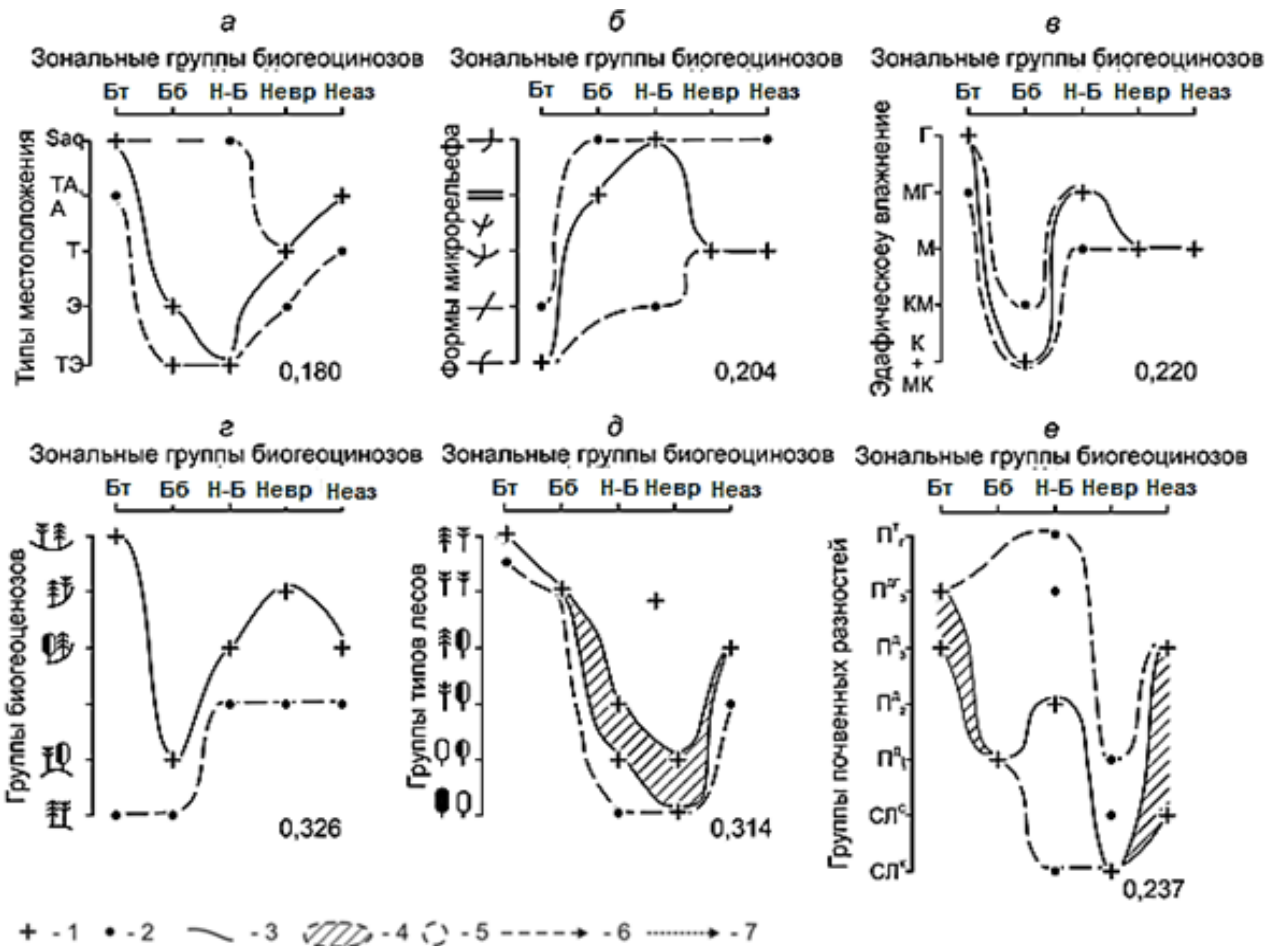
Зональная принадлежность (экспериментальный полигон)			
Широколиственнолесная подзона Приволжской возвышенности (урочище Зеленый Город)		Типичная лесостепь Приволжской возвышенности (Природный национальный парк «Чаваш Вармане» – Присурье)	
Мезоморфные и ксеро-мезоморфные елово-сосновые леса пологих песчаных склонов	 4 Т	Мезо-гидроморфные ельники и сосняки слабо дренируемых междуречных понижений и высокой поймы	 Т-ТА
Мезо-гидроморфные сосняки и ельники междуречных понижений и надпойменных террас	 5 ТА	Мезо-гидроморфные елово-липовые дубравы и сосново-березовые леса полого-вогнутых склонов песчано-суглинистых междуречий	 А
Гидроморфные черноольшаники высокой песчано-суглинистой поймы и долин малых рек	 6 СА	Гидроморфные (заболоченные) сосняки, с елью и березой, междуречных западин моренной и песчаной равнин	 ЭА

**Примечания к таблице 1.** Древостой-доминанты: 1 –  сосна, 2 –  ель, 3 –  дуб, 4 –  липа, вяз, 5 –  широколиственные без разделения, 6 –  береза, осина, 7 –  ольха черная. Напочвенный покров: 8 – III лугово-степное разнотравье. Почвообразующие породы: 9 –  пески, 10 –  супеси и легкие суглинки, 11 –  средние и тяжелые суглинки, 12 –  супесчано-суглинистая морена с валунами, 13 –  карбонатные породы (известняки, доломиты). Локальные типы местоположений (геотопы): Э – элювиальный, ТЭ – трансэлювиальный, Т – транзитный, ТА – трансаккумулятивный, А – аккумулятивный, СА – супераквальный, ЭА – элювиально-аккумулятивный. **Notes to Table 1. Dominant tree stands:** 1 –  pine, 2 –  spruce, 3 –  oak, 4 –  linden, elm, 5 –  broadleaf forest, 6 –  birch, aspen, 7 –  black alder. Soil cover: 8 – III meadow-steppe grasses. Soil-forming rocks: 9 –  sands, 10 –  sandy loams and light loams, 11 –  medium and heavy loams, 12 –  sandy-loamy moraine with boulders, 13 –  carbonate rocks (limestones, dolomites). Local geotopes: Э – eluvial, ТЭ – trans-eluvial, Т – transit, ТА – trans-accumulative, А – accumulative, СА – superaqual, ЭА – eluvial-accumulative.

Такие модели по сути не выходят за рамки синэкологии, оставляя вне поля зрения географическую (пространственную) экологию. Это модели с концентрированными параметрами; они не обеспечивают территориального охвата надпарцеллярных ландшафтных единиц, (биогеоценозов, урочищ, местностей) в их организации и реакции на внешние возмущения, что и является определенным ограничением континуальных имитационных моделей.

В проведенных автором исследованиях мониторинг лесных экосистем осуществлялся на основе дискретных эмпирических статистических моделей, согласно (Розенберг, 1984). Эти модели позволяют оперировать относительно небольшим числом наиболее информативных признаков и получать результаты, может быть, не столь точные, как при динамическом имитационном моделировании, но с более высоким пространственным разрешением и, что самое важное, – прогнозировать поведение экосистем в виде целостных образований. В эмпирико-статистических прогнозных моделях результаты полевых и

лабораторных исследований используются не для проверки каких-либо расчетных данных, а как фактологическая основа собственно моделирования. В отличие от динамических имитационных моделей, предложенный и реализованный автором метод локального дискретного моделирования природных экосистем с большим основанием можно считать биогеоценотическим методом – в духе теории В.Н. Сукачева (1972).



**Рис. 2.** Бинарная ординация зонально-географических групп фаций по литогенным, гидроэдафическим, фитоценотическим и почвенным факторам экосистемы Присурье («Чаваш Вармане»). *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. Группы биогеоценозов по эдафическому увлажнению: К – ксерофитная, МК – мезо-ксерофитная, М – мезофитная, МГ – мезо-гидрофитная, Г – гидрофитная. 0,149, 0,159, ... – нормированные коэффициенты сопряженности К(А; В). Группы биогеоценозов – таблица 1. **Fig. 2.** Binary ordination of zonal-geographical groups of facies based on lithogenic, hydroedaphic, phytocenotic, and soil factors of the Prisurye ecosystem (“Chavash Varmane”). *Legend:* 1 – ecological dominant, 2 – “blurred” part of the ecological niche, 3 – trajectory connecting ecological dominants, 4 – space of the ecological niche, 5 – enclave, 6 – direction of possible transgression of a given phenomenon from its ecological dominant, 7 – area of sporadic distribution of the phenomenon within the given

gradations of the factor. Zonal groups of biogeocoenoses: BT – boreal taiga, BB – boreal pine forest, N/B – nemoral-boreal, B/N – boreal-nemoral, N – nemoral. Groups of biogeocoenoses by edaphic moisture: K – xerophytic, MK – meso-xerophytic, M – mesophytic, MG – meso-hydrophytic, G – hydrophytic. 0.149, 0.159, ... – normalized contingency coefficients K(A; B). Biogeocoenoses groups – see Table 1.

Пространственно-функциональный мониторинг лесных экосистем базируется на эмпирически установленных локальных и региональных ландшафтно-экологических связях, которые рассматриваются как механизмы метаболических реакций лесных экосистем на определенные климатические тренды (рис. 2). Таким образом, речь идет о принципиально новом, *эмпирико-имитационном базовом и прогнозном моделировании природных экосистем* при их климатогенном мониторинге.

Это моделирование послужило основным инструментом предпрогнозного ландшафтно-экологического анализа и затем вошло в алгоритм самих прогностических расчетов. Эмпирическая имитация ландшафтно-экологических прогнозов реализуется как воспроизводство прогнозируемых сценариев биогеоценологических систем по закономерностям их базовой пространственной организации, с заменой в прогнозной процедуре пространственных координат на временные, в соответствии с фундаментальными свойствами эргодичности природной среды.

В процедурах прогнозирования использовались:

1) локальная эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда с использованием моделей бинарной гидро- и термо-эдафической ординации лесных топозэкосистем;

2) свойства полизональности локальных экосистем как способ их реакции на глобальные изменения климата;

3) эмпирическая имитация климатически обусловленных изменений биологического цикла на основе гидротермического ординационного анализа его параметров (табл. 2);







4) эмпирическая имитация изменений продуктивности и стока углерода в лесных экосистемах при колебаниях климата.

Термо- и гидро-эдафическая ординация метаболических характеристик лесных топозэкосистем проведена по 2 геофизическим параметрам: температуре почвы на глубине 50 см ( $t_{50}$ ) и запасам летней продуктивной влаги в слое почвы 0-50 см (Коломыц, 2025). Эти связи не всегда достаточно высоки, хотя и вполне значимы. Как известно, при описании сложных многокомпонентных биологических систем коэффициенты корреляции и детерминации не могут быть высокими, поскольку биологическая система и ее компоненты существуют по своим внутренним законам (Montgomery, Peck, 1982).

На основе полученных связей разработаны алгоритмы расчетов углеродного баланса бореальных и неморальных лесных биогеосистем, а также объемов поглощения ими парниковых газов при прогнозируемых глобальных изменениях климата на 100-200-летнюю перспективу. Выявлены критические гидротермические состояния зональных типов лесов у южной границы лесного пояса, характеризующие их потенциальную адаптацию к кардинальным изменениям климата, с соответствующей абсорбцией парниковых газов.

Следует отметить, что динамико-имитационные и эмпирико-имитационные модели нельзя считать взаимозаменяемыми. Как показал сравнительный анализ моделей реакций растений на климатические изменения (Lischke et al., 1998), динамическое имитационное моделирование обеспечивает детальную «развертку во времени» изучаемого параметра экосистемы, но ограничены в пространственной экстраполяции результатов. В то же время эмпирико-имитационные модели, будучи статическими, могут описывать территориальное разнообразие прогнозируемых ситуаций, но страдают неопределенностью во времени.

**Таблица 2.** Распределение групп биогеоценозов Приокско-Террасного биосферного резервата по их зонально-географическим группам,  $K(A;B)^* = 0.212$ . **Table 2.** Distribution of biogeocoenosis groups of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve by their zonal-geographical groups,  $K(A;B) = 0.212$ .

Зонально-географические группы биогеоценозов	Группы биогеоценозов (табл. 1).					
						
Бореальная таежная	–	2.57 ● ×**	–	1.00	1.29 ●	1.29 ●
Бореальная боровая	2.81 ● ×	–	–	0.63	–	2.41 ×
Неморально-бореальная	2.81 ● ×	–	–	–	1.61 ×	1.61 ●
Бореально-неморальная	–	1.61 ●	2.41 ×	0.63	1.21 ×	0.40
Неморальная	–	0.80	0.80	3.13 ×	0.80	–
← общее направление термо-аридного климатического тренда						

**Примечания к таблице 2:**  $K(A;B)^*$  – нормированный коэффициент межкомпонентной сопряженности, ×\*\* – область экологического доминанта, ●\*\* – градации образуют «размытую» часть климатической ниши. **Notes to Table 2:**  $K(A;B)^*$  – normalized inter-component contingency coefficient, ×\*\* – the area of the ecological dominant, ●\*\* – gradations that form the blurry part of the climatic niche.

В связи с этим мы принимаем, что приоритетным объектом ландшафтно-экологического прогнозирования в пределах столетия должна быть не структурная эволюция экосистем, а направленное изменение их функции, т.е. сдвиги в малом биологическом цикле, которые в зоне тайги происходят в течение первых лет, а в подзоне широколиственных лесов – в течение года (Коломыц, 2020). Эти характерные времена функциональной релаксации лесов пропорциональны экзогенным изменениям содержания углерода в лесной фитомассе (живой и мертвой) и в подвижном гумусе почвы. Такой подход полностью соответствует предмету данного научного исследования.

### Количественный метод ландшафтно-экологического прогнозирования

Ландшафтно-экологический подход к моделированию функционально-структурных параметров локальных экосистем базируется на биохорологической концепции (Тимофеев-Ресовский, 1970) о пространственной организации круговоротов массы и энергии живым веществом в биогеоценозах (фациях) как дискретных элементарных структурных единицах биосферы. Согласно теоретическим разработкам в этом направлении (Горшков, 1995), биосфера рассматривается как статистический ансамбль биохорологических единиц, слабо взаимодействующих между собой, но имеющих высокоупорядоченную внутреннюю организацию (благодаря стабилизирующему отбору). Каждой группе биогеоценозов приписываются определенные функциональные характеристики, связанные со структурой локальных потоков вещества и энергии. Такой подход позволяет на основе комплексных эмпирических данных, полученных в ходе полевых исследований, прогнозировать закономерности поведения лесных сообществ в различных геоморфологических и эдафических условиях, сохраняя статистические методы их анализа.

Ландшафтно-экологический прогноз как центральное звено мониторинга имеет экспериментальный характер. Он разрабатывался как система операций с экологическими (гидротермическими) нишами локальных и региональных биогеосистем на основе их

отношений включения как описательных векторов (Коломыц, 2008, 2018). Общий принцип прогноза гласит: величина климатически обусловленной трансформации одной экосистемы в другую тем больше, чем меньше степень пересечения их климатических ниш в исходных состояниях и чем больше будет диапазон перекрытия ниш после сближения экосистем по данному климатическому фактору. По сочетанию этих соотношений оцениваются наиболее вероятные направления и степень трансформации экосистемы. В отличие от известных отечественных и зарубежных подходов данный метод предусматривает множественный характер трансформации гео(эко)системы при фиксированном климатическом тренде, когда ее новое состояние может иметь характеристики не одного, а нескольких состояний, существовавших в начальный момент.

Вычисляются вероятности устойчивости (стабилизации) каждого объекта и его переходов в другие объекты в соответствии с заданным климатическим трендом. Модели воспроизводят прогнозируемые состояния объектов путем эмпирической имитации пространственно распределенных параметров их экологических ниш. В расчетах используются методы теории информации, описательных («нечетких») множеств и марковских цепей. Разработаны оригинальные методы построения матриц и ориентационных графов вероятностей ландшафтно-фациальных переходов, описывающих общую картину реакции лесных экосистем данного экорегиона на прогнозируемые климатические изменения. Приведены также методы расчета и построения средневзвешенных (в масштабе данного экорегиона) матриц и ориентированных графов ландшафтно-экологических переходов.

Сам прогноз можно считать управляемым экспериментом, по определению (Хелберт, 2008). Исследователь задает входные переменные и на выходе получает картину прогнозируемых структурно-функциональных состояний объектов в данной статистической выборке, с выявлением новых объектов за пределами выборки. Процедура прогнозирования включают два этапа: (1) оценку вероятностей изменения функциональных состояний экосистем и (2) расчеты скоростей трансформаций экосистем. Подробно описаны алгоритмы прогностических расчетов для обоих этапов (Коломыц, 2018, 2020).

Прогнозные ландшафтно-зональные построения базировались на выявленной достаточно тесной связи растительных формаций Волжского бассейна с коэффициентом годового атмосферного увлажнения, с которым также хорошо коррелирует летнее влагосодержание почвы (Коломыц, 2008, 2018). Такие ординационные ряды указывают на то, в какой последовательности следует ожидать зональные фитоценологические переходы при том или ином климатическом тренде. Построенные по этим связям карто-схемы прогнозируемых зонально-региональных экологических условий описывают последовательное смещение зональных и подзональных границ к северу под действием термо-аридного климатического тренда.

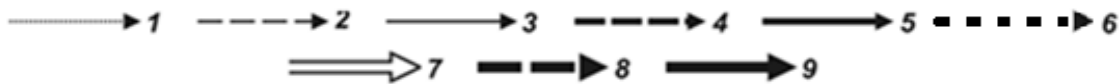
Климатические параметры взяты из прогнозных сценариев двух глобальных моделей семейства общей циркуляции атмосферы AOGCMs: умеренной E GISS (Pope et al., 2000) и экстремальной HadCM3, версия A2 (Мохов, 2006; Hansen et al., 2007). Первая модель дает пределы климатических изменений, соответствующие целям Парижского соглашения по изменению климата (Paris Agreement, 2015), – не допустить среднегодовое потепление более чем на 1.5-2.0°C к середине нашего столетия, т.е. к сроку удвоения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. Однако современное глобальное потепление, начавшееся с середины 1980-х годов (Ранькова и др., 2024), способно привести к повышению средней температуры на территории России уже к концу века на 6-11°C (Швиденко и др., 2017), что адекватно климатическому прогнозу, который дает экстремальная модель HadCM3.

Результаты локального прогнозного анализа представлены как в графоаналитических моделях (рис. 3), так и на крупномасштабных карто-схемах (рис. 4).

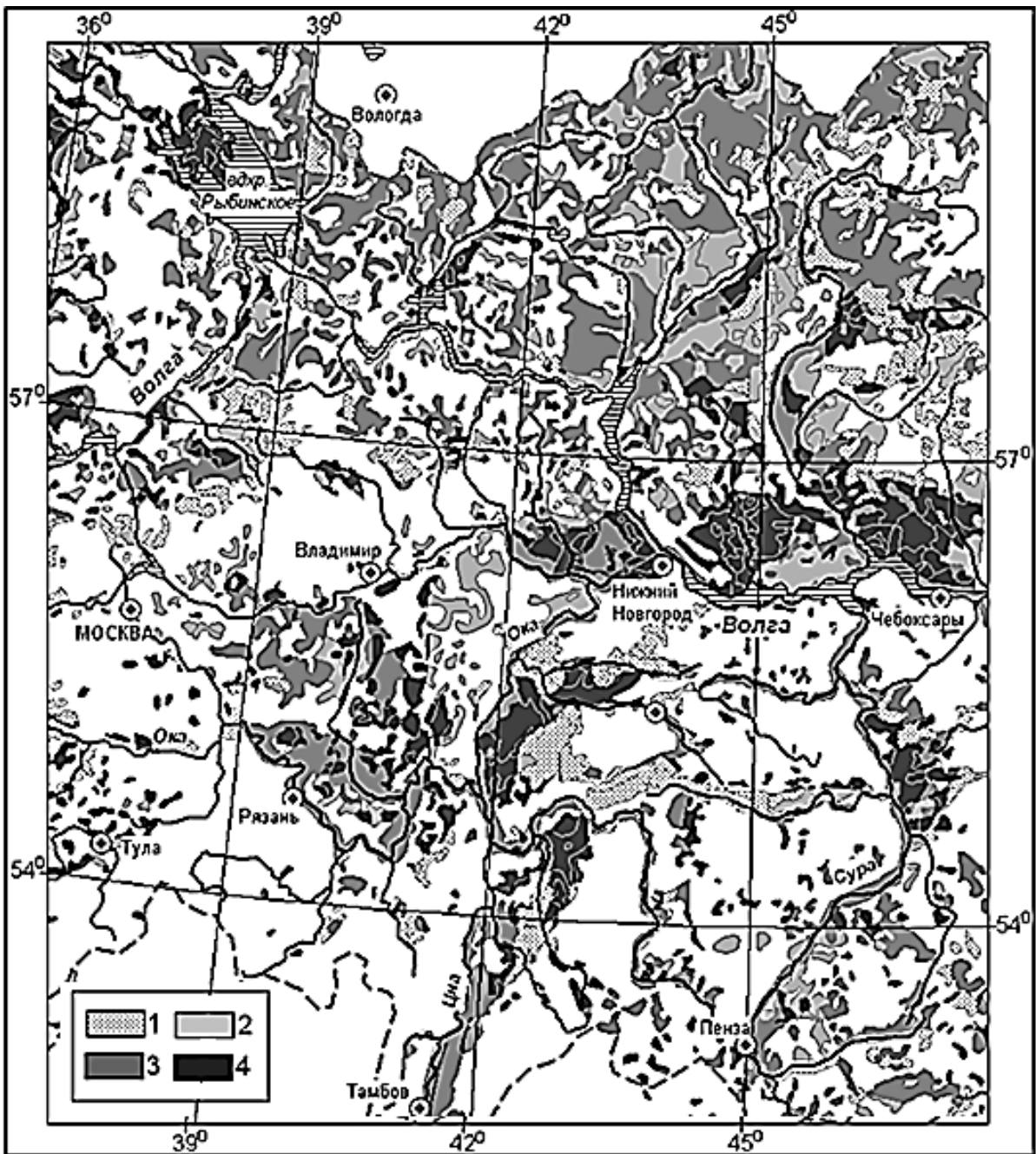
а) Природный национальный парк "Чаваш Вармане" (полигон 2)  
Подзона типичной лесостепи. Прогноз на 2100 г.



б) Керженский резерват. Северная приграничная полоса зона смешанных лесов. Заволжское низменно-зандровое полевье (полигон 6). Прогноз на 2150 г.



**Рис. 3.** Экологический прогноз по экстремальной климатической модели HadCM3, орграфы функциональных переходов между группами биogeocoenozов в различных эcoreгионах Среднего Поволжья. Вероятности переходов: 1 –  $\leq 0.10$ , 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. **Fig. 3.** Ecological forecast based on the HadCM3 extreme climate model, directed graphs of functional transitions between biogeocoenoses groups in different eco-regions of the Middle Volga Region. Transition probabilities: 1 –  $\leq 0.10$ , 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.



**Рис. 4.** Карта-схема баланса углерода в лесных формациях Окско-Волжского бассейна на 2050 г., согласно прогнозной климатической модели HadCM3 (Коломыц и др., 2009). Изменение общего содержания углерода, т/га: 1 –  $(-76) \div (-14)$ , 2 –  $(-14) \div (0)$ , 3 –  $0 \div 20$ , 4 –  $20 \div 162$ . **Fig. 4.** Carbon balance map in forest formations of the Oka-Volga basin for 2050 according to the HadCM3 forecast climate model (Kolomyts et al., 2009). Change in total carbon content, t/ha: 1 –  $(-76) \div (-14)$ , 2 –  $(-14) \div (0)$ , 3 –  $0 \div 20$ , 4 –  $20 \div 162$ .

Прогнозируется прогрессивно усиливающийся термо-аридный биоклиматический тренд с общим смещением зональных границ к северу и с соответствующими изменениями растительного покрова. Процесс аридизации начнется с южных маргинальных

широколиственных лесов и пойдет по следующей сукцессионной схеме: чистые и еловые дубравы → боровые сосняки и елово-сосновые субори → типичная хвойная и мелколиственная лесостепь → северная и средняя степь → южная (сухая) степь. Подтаежная зона будет отличаться в целом более высокой устойчивостью лесов к ожидаемому глобальному потеплению. Общая климатическая аридизация вызовет местные функциональные переходы, направленные преимущественно снизу вверх по системе ландшафтных сопряжений. Остепнению подвергнутся в первую очередь хвойные леса верхних звеньев катен – ксероморфные и мезо-ксероморфные сосняки и елово-сосновые леса.

Согласно экстремальной модели HadCM3, на месте подзоны широколиственных лесов и южной полосы подтаежной зоны Среднего Поволжья будет развиваться хвойная (сосновая) лесостепь как новый (для данного региона) зональный экотон прямого контакта бореальных и степных растительных формаций, с мозаичным комплексом светлохвойных и дубово-мелколиственных парковых лесов, лугов и степей. Будущий процесс «саваннизации» широколиственных и смешанных лесов Русской равнины – неизбежное следствие современного термо-аридного климатического тренда.

### **Идеология и методика количественных оценок устойчивости лесных экосистем**

Одним из основных положений Парижского соглашения об изменении климата (Paris Agreement, 2015) является решение проблемы адаптации экосистем – усиление их адаптивных возможностей, повышение устойчивости и снижение уязвимости к изменению климата. Механизмы адаптации лесных экосистем к глобальным климатическим сигналам рассматриваются нами через призму их функциональной устойчивости к воздействию этих сигналов. В российской геоэкологии устойчивость до сих пор оценивают по качественным градациям, таким как слабая, средняя и высокая, а строгие критерии классификации порой отсутствуют.

В зарубежных работах по экологии леса их устойчивость описывается также качественно, с использованием некоторых количественных показателей: скорости роста, продуктивности, компактности древостоя, видового разнообразия, поврежденности растений (Chapin et al., 1997; Thompson et al., 2009). Предполагается, что существует базовое соотношение между биологическим разнообразием, продуктивностью и устойчивостью лесов, и что это соотношение имеет практическое значение для адаптивного мониторинга лесов при изменении климата (Thompson et al., 2009).

В общей экологии имеются разработанные математические модели устойчивости относительно простых экосистем – отдельных популяции и их совокупностей (Светлосанов, 2009). К сожалению, это моделирование не нашло широкого применения в ландшафтной экологии, где объекты исследования значительно сложнее, отличаются вероятностным характером внутренних и внешних взаимодействий, а также нелинейным поведением, связанным с регулируемой сетью положительных и отрицательных обратных связей.

Устойчивость и функционирование этих систем определяется в первую очередь геохимическими циклами – годовым и многолетним оборотом органического вещества (Свирижев, 1983). На основе данного концептуального положения был разработан метод количественной оценки устойчивости лесных экосистем как целостных элементарных хронологических единиц, в духе учения В.Н. Сукачева (1972) о биогеоценозах, а не по отдельным их структурным или функциональным характеристикам, что практиковалось ранее (Коломыц, 2018, 2020). Такой подход является в полном смысле ландшафтно-экологическим. Его эффективность состоит в том, что он опирается на дискретные

параметры биологического круговорота.

Выделяются два уровня устойчивости – лабильный фитоценологический и инерционный почвенно-биотический. По каждому из них с помощью метрики евклидового расстояния рассчитываются индексы резистентной и упругой устойчивости лесных биогеоценозов. Такие индексы служат комплексными параметрами функционального состояния локальных гео(эко)систем. В расчетах индексов устойчивости используются следующие параметры метаболизма: коэффициент оборота надземной фитомассы, массы лесной подстилки и гумуса, подстилично-опадный индекс. Количественно оценена относительная роль каждого метаболического фактора в том или ином индексе устойчивости, а также проведена верификация рассчитанных моделей.

На основе полученных мер с помощью новых методов геоморфометрии (Шарая, 2009) рассчитаны и построены карты-матрицы индексов устойчивости лесных биогеоценозов на экспериментальных полигонах, а также индексы устойчивости лесных формаций основного водосбора Волжского бассейна. Переход с локального уровня картографирования устойчивости лесов Окско-Волжского бассейна на региональный осуществлялся с помощью специально разработанного метода индукционно-иерархической экстраполяции, основанного на эмпирически установленном явлении полизональности локальных гео(эко)систем как формы их реакции на глобальные изменения климата (Коломыц, 2020).

Аналитическое и картографическое моделирование устойчивости лесных биогеоценозов южной части лесной полосы Среднего Поволжья позволяет сделать следующие выводы. На начальном этапе неблагоприятного внешнего воздействия реакция лесных биогеоценозов, имеющих тенденцию к выживанию, заключается в снижении интенсивности годового оборота надземной фитомассы и/или усилении минерального питания растений веществами из гумусового горизонта почвы. После этого регенерационный потенциал реализуется за счет активизации процессов деструкции мертвого органического вещества в лесной подстилке, а затем – за счет увеличения годового производства зеленой массы, т.е. общего усиления биологического круговорота.

### **Оценка роли лесного покрова в регуляции углеродного цикла и смягчения глобального потепления**

Основная задача третьего, заключительного этапа мониторинга состоит в разработке мер по снижению отрицательных экологических последствий глобального потепления. Одной из этих мер является достижение баланса между возникающими в результате деятельности человека парниковыми газами и их поглощением земным покровом, в т.ч. лесами. В качестве идеологической основы научного поиска по указанной проблеме использовано известное положение об экологических ресурсах лесного покрова как его способности поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата (Горшков, 1995; Лосев, 2001). Эта регуляция направлена на возвращение среды в оптимальное для лесной экосистемы состояние и способствует сохранению относительной стабильности ее продукционного процесса в меняющемся климате, что обеспечивает и устойчивость механизмов самой регуляции углеродного цикла как ведущего звена биологического круговорота.

Для оценок изменений содержания углерода в различных биотических компонентах использован известный лесоводственный метод, основанный на динамике живых и мертвых фитомасс. Он дает наилучшие результаты при расчетах составляющих углеродного цикла за большие промежутки времени. Углеродный баланс леса складывается в результате сложных соотношений положительных и отрицательных изменений биомассы, некромассы и массы гумуса. Если при потеплении дополнительное поглощение лесным сообществом диоксида

углерода преобладает над его эмиссией, то общий углеродный баланс положителен. Это означает положительную регуляцию углеродного цикла. Однако отдельные звенья региональной катенарной системы могут иметь (при данном климатическом прогнозе) столь значительные снижение массы углерода, что это приводит к его общему отрицательному балансу, т.е. к негативной регуляции углеродного цикла лесами данного экорегиона (табл. 3).

На основе балансовых уравнений рассчитаны и закартированы возможные изменения потоков углерода между почвенно-растительным покровом и атмосферой в различные прогнозируемые сроки для каждой биогеоценотической группы на экспериментальных полигонах и для каждой растительной формации Окско-Волжского бассейна (табл. 3; рис. 4).

Следует отметить неправомерность экстраполяции модельных сценариев биологического круговорота и углеродного баланса, которые получаются при динамико-имитационном моделировании «типичных биомов» (Тарко, 2005; Beets et al., 2011; Franklin et al., 2017), на всю территорию природной зоны/подзоны или крупного региона. Для каждого структурного подразделения той или иной зонально-региональной единицы углеродный баланс необходимо рассчитывать в рамках местных закономерностей их катенарной организации (табл. 3), получая затем таксономическую (средневзвешенную по площади) норму углеродного баланса. Это приводит к совершенно иным результатам балансовых расчетов по сравнению с расчетами по «типичным» (фоновым) биомам (Тишков, 2005).

**Таблица 3.** Изменения суммарного содержания углерода (т/га) в различных лесных биогеоценозах на 3 особо охраняемых природных территориях Окско-Волжского бассейна для прогнозного срока 2200 г., согласно климатической модели E GISS. **Table 3.** Changes in the total carbon content (t/ha) in various forest biogeocenoses in 3 specially protected natural areas of the Oka-Volga basin for the forecast period of 2200, according to the E GISS climate model.

Экспериментальные полигоны	Группы биогеоценозов (типы местоположений)						Сумма
	1 (ТЭ)	2 (ТЭ, Э)*	3 (Э, ТЭ)	4 (Э-ТА)	5 (ТА-А)	6 (СА, ЭА)	
Самарская Лука	9.55 [+]**	-1.20 [-]***	3.34 [+]	-1520 [-]	-36.04 [-]	1.22 [+]	-8.89 [-]
«Чаваш Вармане»	7.33 [+]	46.83 [+]	-61.03 [-]	12.34 [+]	7.05 [+]	35.72 [+]	19.71 [+]
Приокско-Террасный резерват	20.39 [+]	-13.13 [-]	-44.80 [-]	13.85 [+]	7.26 [+]	-26.02 [-]	-7.07 [-]

**Примечания к таблице 3:** курсив\* – плакорные биогеоценозы, [+]\* – смягчение климатического тренда, [-]\*\*\* – усиление климатического тренда. **Notes to Table 3:** italic\* – upland biogeocenoses, [+]\* – decreasing climate trend, [-]\*\*\* – increasing climate trend.

На основе прогностических моделей в каждом экорегионе выявлены определенные локальные ряды и зонально-региональные типы регуляции содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере при развитии климатической термо-аридизации. В соответствии с площадным распространением этих типов оценен суммарный региональный вклад лесной фитобиоты в устойчивость этой части континентальной биосферы. По удельным и суммарным показателям углеродного баланса лесных формаций Волжского бассейна проведена детальная количественная оценка их экологических ресурсов, обеспечивающих как положительную, так и отрицательную регуляцию углеродного цикла (рис. 4). Полученные результаты исследований по данному

направлению могут быть включены в эмпирическое обоснование новой экологически ориентированной парадигмы в учении о лесе.

В процессе воздействия климатического сигнала происходит функциональная, а затем и структурная адаптация лесных сообществ к новым гидротермическим условиям, и это сопровождается соответствующими изменениями их углеродного баланса. Для прогнозного периода регионального потепления на 2050-2200 годы с помощью моделей фитоценологических переходов проведены расчеты конечных значений углеродных балансов лесных формаций Окско-Волжского бассейна. Эти балансы характеризуют механизмы регуляции лесами углеродного цикла уже после произошедших за прошедший после 1985 года интервал их преобразований под действием современного глобального потепления. Проведено сравнение начальных (базовых) и конечных значений углеродных балансов. Сравнительный анализ выполнен для 2 условных типов лесных экосистем бассейна: восстановленных коренных лесов и реального лесного покрова (коренные + производные леса).

Установлено, что замещение коренных лесов (хвойных, смешанных и широколиственных) производными (мелколиственными) приводит к общему и весьма значительному сокращению экологических ресурсов лесного покрова. Согласно прогнозам, это должно проявиться в снижении общей положительной регуляции углеродного цикла. Широкое распространение в лесном поясе Восточноевропейского субконтинента длительно-производных мелколиственных сообществ, снижает даже при мягком (е-гиссовском) термо-аридном прогнозируемом сценарии почти в 3 раза суммарное дополнительное поглощение лесами парниковых газов по сравнению с гипотетически восстановленными коренными лесами. Такова общая вызванная человеком потеря экологических ресурсов бореальных и неморальных лесов Волжского бассейна со времен начала в нем интенсивного земле- и лесопользования.

Верификация расчетных прогнозных моделей углеродного баланса проведена по материалам многолетних (1990-2009 гг.) наземных и дистанционных измерений содержания углерода в бореальных лесах экосистем Центральной Канады (Stinson et al., 2011). Проведенные по этим материалам контрольные расчеты годового и среднего для данного периода экосистемного стока углерода оказались достаточно близкими к прогнозируемым значениям углеродного баланса по экстремальной модели HadCM3 на период до 2100 г., прежде всего, для реального лесного покрова. Модель же E GISS дала явно заниженные прогнозные результаты по сравнению с «канадским контролем».

Проведенное аналитическое и картографическое моделирование углеродных балансов лесных формаций Волжского бассейна в системе их термо-аридных преобразований проливает определенный свет на двуединую проблему, поставленную Парижским соглашением (Paris Agreement, 2015) об изменении климата: о необходимости сопряженного исследования абсорбционной способности лесных биомов и их адаптации к меняющемуся климату, которая должна обеспечивать эффективность самой адсорбции.

В качестве показателя адаптации использована лабильная упруго-пластичная устойчивость лесных экосистем. Для территории Окского бассейна проведен численный эксперимент по оценке влияния устойчивости лесных формаций и прогнозируемых климатических условий на баланс углерода (Коломыц, 2020). Всего получено 8 линейных уравнений множественной регрессии (с уровнем значимости  $P < 10^{-6}$ ), которые предлагается включить непосредственно в «Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов».

Расчеты показали, что в предстоящем 100-летнем прогнозируемом периоде общая упруго-пластичная устойчивость лесных формаций должна возрасти, причем в наибольшей степени при экстремальном потеплении. Соответственно следует ожидать существенного

увеличения способности бореальных лесов абсорбировать парниковые газы. Сопоставление полученных значений углеродного баланса лесных формаций с начальными (базовыми) и конечными (финальными) индексами устойчивости дает однозначную картину существенного увеличения абсорбционной способности бореальных лесов с ростом их восстановительного потенциала. Решающий вклад в увеличение абсорбционной способности вносит рост лесовосстановления.

Анализ прогнозных локальных и региональных расчетов углеродных балансов дает однозначное представление о том, что с ростом адаптационного потенциала бореальных и неморальных лесов Волжского бассейна существенно увеличиваются их экологические ресурсы в смягчении (митигации) современного глобального потепления. Для различных экорегионов бассейна намечены лесные биогеоценозы, которые следует рассматривать как приоритетные сообщества при подборе наиболее оптимального ассортимента древесных пород в различных зональных, геоморфологических и эдафических условиях. Так, в экорегионе Приокско-Террасного биосферного резервата такими биогеоценозами являются элювиальные и транзитные липово-дубовые и сосново-липовые леса, а на территории Самарской Луки – трансаккумулятивные и аккумулятивные теневые широколиственные сообщества (дубово-вязово-липовые) и производные от них березняки и осинники (табл. 1, 3).

Решением данной задачи будет достигнута конечная цель мониторинга – раскрытие экологического потенциала лесов, обеспечивающего переход к адаптивному лесному хозяйству, стратегической целью которого должно стать создание лесов с высоким углеродопоглощающим потенциалом. Это особенно важно для лесоразведения на ныне обезлесенных территориях в условиях ожидаемых изменений климата, а также для лесовосстановления после пожаров и лесоразведения после рубок.

### **Выводы**

Изложены некоторые пути развития теории и методов геоэкологического мониторинга лесов и его ключевого этапа – ландшафтно-экологического прогнозирования. Научно-методический поиск состоял в последовательном решении задач по еще слабо освещенной в отечественной и зарубежной литературе проблеме локального и регионального отклика на предстоящие и уже начавшиеся глобальные изменения климата. Ландшафтно-экологический анализ проведен на конкретных примерах, с привлечением массы наземного и дистанционного фактического материала.

Весь массив научно-методических разработок систематизирован таким образом, чтобы раскрыть содержание геоэкологического мониторинга с помощью многомерного системного анализа, основанного на дискретных эмпирико-статистических моделях базовых и прогнозируемых состояний гео(эко)систем как целостных динамичных образований. Впервые описаны эмпирико-имитационные прогнозные модели и на их основе предложены рабочие эколого-географические концепции. Они раскрывают механизмы формирования ландшафтно-экологических систем как локального, так и регионального уровня, их естественную и антропогенную динамику. Тем самым намечено дальнейшее развитие известной концепции биотической регуляции углеродного цикла в биосфере с помощью изучения в биологическом круговороте локальных механизмов, обеспечивающих устойчивость природной среды в соответствии с принципом Ле Шателье.

Полученные материалы по состоянию лесных экосистем и прогнозным оценкам их грядущих изменений могут иметь определенное научно-практическое значение для самой территории Волжского бассейна как демографического и индустриального «ядра» Европейской России. Они будут полезны при разработке экологических основ сохранения,

воспроизводства и рационального использования лесных ресурсов, что особенно важно для районов с критическими условиями существования лесной растительности, к которым относится обширная зона переходов от леса к степи.

*Финансирование.* Работа выполнена по теме Государственного задания института № 1024032200167-2: «Разработка научных основ экологического мониторинга и методов снижения загрязнения окружающей среды».

*Конфликт интересов.* Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Будыко М.И. 1980. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеодат. 351 с.
2. Герасимов И.П. 1975. Научные основы современного мониторинга окружающей среды // Известия АН СССР. Серия географическая. № 3. С. 13-26.
3. Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Денисенко Е.А., Тихонов В.А. 2005. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 41. № 1. С. 25-35.
4. Гордиенко Н.С. 2017. Современные тенденции изменений климата и биоты на Южном Урале // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXVIII. № 5. С. 87-99.
5. Горшков В.Г. 1995. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ. 470 с.
6. Замолодчиков Д., Грабовский В., Курц В. 2014. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. № 2 (39). С. 23-31.
7. Израэль Ю.А. 1974. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. Вып. 7.
1. Budyko MI. Climate in the past and future [*Klimat v proshlom i buduchshem*]. Leningrad: Gidrometoidat, 1980:351.
2. Gerasimov IP. Scientific foundations of modern environmental monitoring [*Nauchnye osnovy sovremennogo monitoringa okruzhayushchey sredy*]. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences [Izvestiya AN SSSR] Geographical Series [Seriya geograficheskaya]*. 1975;3:13-26.
3. Golubyatnikov LL, Mokhov II, Denisenko EA, Tikhonov VA. Model assessments of the impact of climate change on vegetation cover and carbon sink from the atmosphere [*Model'nye otsenki vliyaniya izmeneniy klimata na rastitel'ny pokrov i stok ugleroda iz atmosfery*]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya RAN] Physics of the Atmosphere and Ocean [Fizika atmosfery i okeana]*. 2005;41 (1):25-35.
4. Gordienko NS. Modern trends in climate and biota change in the Southern Urals [*Sovremennye tendentsii izmeneniy klimata i bioty na Yuzhnom Urale*]. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling [Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem]*. 2017;XXVIII (5):87-99.
5. Gorshkov VG. Physical and biological foundations of life sustainability [*Fizicheskie i biologicheskie osnovy ustoychivosti zhizni*]. Moscow: VINITI, 1995:470.
6. Zamolodchikov D, Grabovsky V, Kurts V. Carbon balance management in Russian forests: past, present, and future [*Upravlenie balansomugleroda lesov Rossii: proshloe, nastoashchee i budeshchee*]. *Sustainable Forest Management [Ustoychivoe lesopol'zovanie]*. 2014;2 (39):23-31.

- С. 5-14.
8. Израэль Ю.А. 1984. Экология и контроль состояния природной среды. 2-е изд., доп. Л.: Гидрометеиздат. 560 с.
  9. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г. 2011. Геоинженерия климата: возможности реализации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIV. С. 11-22.
  10. Коломыц Э.Г. 2008. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука. 427 с.
  11. Коломыц Э.Г. 2018. Экспериментальная географическая экология. Записки географ-натуралиста. М.: Тов-во научных изданий КМК. 716 с.
  12. Коломыц Э.Г. 2020. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальных изменениях климата. Экологические ресурсы бореальных лесов. М.: Наука. 423 с.
  13. Коломыц Э.Г. 2025. Эмпирико-имитационное прогнозное моделирование лесных экосистем в их климатогенном мониторинге // Экосистемы: экология и динамика. Т. 9. № 2. С. 79-103.
  14. Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С., Шарая Л.С. 2009. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // Экология. № 6. С. 1-8.
  15. Котова Т.В. 1987. Растительность Европейской части СССР и Кавказа. М. 1:2000 000. М.: ГУГК. 4 л.
  16. Лосев К.С. 2001. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. М.: Космосинформ. 399 с.
  17. Мохов И.И. 2006. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке в
  7. Izrael YuA. Global observation system. forecasting and assessment of changes in the state of the environment. Fundamentals of monitoring [Global'naya sistema nablyudeny. Prognoz i otsenka sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy. Osnovy monitoringa]. *Meteorology and Hydrology [Meteorologiya i gidrologiya]*. 1974;7:5-14.
  8. Izrael YuA. Ecology and monitoring of the state of the natural environment. 2<sup>nd</sup> ed., suppl. [*Ecologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoy sredy*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984:560.
  9. Izrael YuA, Ryaboshapko AG. Climate Geoengineering: Implementation Possibilities [Geoinzheneriya klimata: vozmozhnosti i realizatsiya]. *Problems of Environmental Monitoring and Ecosystem Modeling [Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem]*. 2011;XXIV:11-22.
  10. Kolomyts EG. Local mechanisms of global changes in natural ecosystems [*Lokal'nye mechinizmy global'nyh izmeneniy prirodnyh ekosistem*]. Moscow: Nauka, 2008:427.
  11. Kolomyts EG. Experimental geographical ecology [*Experimental'naya geograficheskaya ekologiya*] *Notes of a naturalist geographer [Zapiski geografa-naturalista]*. Moscow: Tov-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2018:716.
  12. Kolomyts EG. Carbon balance and resilience of forest ecosystems under global climate change [*Uglerodny balans i ustoychivist' lesnyh ekosistem pri global'nyh izmeneniyah klimata*] *Ecological resources of boreal forests [Ecologicheskies resursy boreal'nyh lesov]*. Moscow: Nauka, 2020:423.
  13. Kolomyts EG. Empirical-simulation predictive modeling of forest ecosystems in their climatogenic monitoring [Empiriko-imitatsionnoe prognoznnoe modelirovanie lesnyh ekosistem v ih klimatogennom monitoringe]. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2025;9 (2):79-103.
  14. Kolomyts EG, Rosenberg GS, Sharaya LS. Landscape ecology methods in predictive assessments of biotic regulation of the carbon cycle under global warming [Metody landchavtnoy ekologii v prognoznyh otsenках bioticheskoy regulyatsii uglerodnogo stikla pri global'nom poteplenii]. *Ecology*. 2009;6:1-8.

- сопоставлении с климатическими изменениями в прошлом и настоящем // Возможности предотвращения изменений климата и его последствий. Проблема Киотского протокола. М.: Наука. С. 75-93.
18. Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф., Антипина У.И., Смирнов В.Д. 2024. Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2023 году // Фундаментальная и прикладная климатология. Т. 10. № 2. С. 288-322.
  19. Розенберг Г.С. 1984. Модели в фитоценологии. М.: Наука. 265 с.
  20. Светлосанов В.А. 2009. Устойчивость природных систем к природным и антропогенным воздействиям (учебное пособие). М.: Изд-во МГУ. 100 с.
  21. Свирезhev Ю.М. 1983. Устойчивость и сложность в математической экологии // Устойчивость геосистем. М.: Наука. С. 41-50.
  22. Сукачев В.Н. 1972. Избранные труды. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука. 418 с.
  23. Тарко А.М. 2005. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит. 231 с.
  24. Тимофеев-Ресовский Н.В. 1970. Структурные уровни биологических систем // Системные исследования. Ежегодник – 1970. М.: Наука. С. 80-113.
  25. Тишков А.А. 2005. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука. 309 с.
  26. Хелберт С.Х. 2008. Неверное истолкование мнимых повторностей и сопутствующие проблемы: ответ Л. Оксанену // Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений). Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН; Нижегородский государственный
  15. Kotova TV. Vegetation of the European part of the USSR and the Caucasus [*Rastitel'nosty Evropeyskoy chasti SSSR i Kavkaza*]. Moscow: GUGK, 1987:4.
  16. Losev KS. Environmental problems and prospects for sustainable development of Russia in the 21<sup>st</sup> century [*Ekologicheskie problemy i perspektivy ustoychivogo razvitiya Rossii v XXI veke*]. Moscow: Kosmosinform, 2001:399.
  17. Mokhov II. Model assessments of possible climate changes in the 21<sup>st</sup> century in comparison with past and present climate changes [*Model'nye otsenki vozmozhnyh klimaticheskikh izmeneniy v XXI veke v sopostavlenii s klimaticheskimi izmeneniyami v prochlom I nastoyashchem*] *Possibilities of Preventing Climate Change and Its Consequences. The Kyoto Protocol Problem* [*Vozmozhnosti predotvrashcheniya izmeneniy klimata. Problema Kiotskogo protokola*]. Moscow: Nauka, 2006:75-93.
  18. Rankova EYa, Samokhina OF, Antipina UI, Smirnov VD. Features of the temperature regime at the earth's surface in 2023 [Osibennosti temperaturnogo rezhima u poverhnosti Zemnogo chara v 2023 godu]. *Fundamental and Applied Climatology* [*Fundamental'naya i prikladnaya ekologiya*]. 2024;10 (2):288-322.
  19. Rosenberg GS. Models in phytocenology [*Modeli v firotsenologii*]. Moscow: Nauka, 1984:265.
  20. Svetlosanov VA. Resilience of natural systems to natural and anthropogenic impacts (study guide) [*Ustoychivosty prirodnyh sistem k prirodnyim i antropogennym vozdeystviyam (uchebnoe posobie)*]. Moscow: Izd-vo MGU, 2009:100.
  21. Svirezhev YuM. Resilience and complexity in mathematical ecology [*Ustoychivosty i slozhnosty v matematicheskoy ekologii*] *Resilience of Geosystems* [*Ustoychivosty geosistem*]. Moscow: Nauka, 1983:41-50.
  22. Sukachev VN. Selected Works [*Izbrannye Trudy*] *Fundamentals of forest typology and biogeocenology* [T. 1: *Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii*]. Leningrad: Nauka, 1972;1:418.
  23. Tarko AM. Anthropogenic changes in global biosphere processes. Mathematical modeling [*Antropogennye izmeneniya global'nyh*

- университет им. Н.И. Лобачевского. С. 61-65.
27. Шарая Л.С. 2009. Предсказательное картирование лесных экосистем в геоэкологии // Поволжский экологический журнал. № 3. С. 249-257.
  28. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Краксер Ф., Онучин А.А. 2017. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. № 6. С. 3-25.
  29. Beets P.N., Kimbereley M.O., Paul T.S., et al. 2011. Planted Forest Carbon Monitoring System – Forest Carbon Model Validation Study for *Pinus radiata* // New Zealand Journal of Forest Science. Vol. 41. P. 177-189.
  30. Chapin F.S., Walker B.H., Hobbs R.J., Hooper D.U., Lawton J.H., Sala O.E., Tilman D. 1997. Biotic Control over the Functioning of Ecosystems // Science. Vol. 277. P. 500-504.
  31. Franklin J., Serra-Diaz J.M., Syphard A.D., Regan H.M. 2017. Big Data for Forecasting Global Change Impact on Plant Communities // Global Ecology and Biogeography. Vol. 26. No. 1. P. 6-17.
  32. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepachenko D.G. 2015. Boreal Forest Health and Global Change // Science. Vol. 349. No. 6259. P. 819-821.
  33. Hansen J., Sato M., Ruedy R., et al. 2007. Climate Simulations for 1880-2003 with GISS Model E // Climate Dynamics. Vol. 29. P. 661-696.
  34. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. 2002. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press. 560 p.
  24. Timofeev-Resovsky NV. Structural levels of biological systems [Strukturnye urovni biologicheskikh sistem] Systems Research [Sistemnye issledovaniya] Yearbook – 1970 [Ezhegodnik – 1970]. Moscow: Nauka, 1970:80-113.
  25. Tishkov AA. Biospheric functions of natural ecosystems of Russia [Biosfernye funktsii prirodnyh ekosistem Rossii]. Moscow: Nauka, 2005:309.
  26. Helbert SH. Misinterpretation of imaginary replicates and associated problems: a response to L. Oksanen [Nevernoe istolkovanie mnimyyh povtornostey i soputstvuyushchie problemy: otvet L. Oksaninu] Problems of ecological experiment (planning and analysis of observations) [Problemy ekologicheskogo eksperimenta (planirovanie i analiz nablyudeny)]. Togliatti: Institut ekologii Volzhskogo basseyna RAN; Nizhegorodskiy gosudarstvennyy universitet im. N.I. Lobachevskogo, 2008:61-65.
  27. Sharaya LS. Predictive mapping of forest ecosystems in geoecology [Predskazatel'noe kartirovanie lesnyh ekosistem v geoekologii]. Ecological Journal of the Volga Region [Povolzhskiy ekologicheskyy zhurnal]. 2009;3:249-257.
  28. Shvidenko AZ, Shchepachenko DG, Kraxner F, Onuchin AA. Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological prerequisites [Perehod k ustoychivomu upravleniyu lesami Rossii: teoretiko-metodichwskie predposylki]. Siberian Forestry Journal [Sibirskiy lesnoy zhurnal]. 2017;6:3-25.
  29. Beets PN, Kimbereley MO, Paul TS, et al. Planted Forest Carbon Monitoring System – Forest Carbon Model Validation Study for *Pinus radiata*. New Zealand Journal of Forest Science. 2011;41:177-189.
  30. Chapin FS, Walker BH, Hobbs RJ, et al. Biotic Control over the Functioning of Ecosystems. Science. 1997;277:500-504.
  31. Franklin J, Serra-Diaz JM, Syphard AD, Regan HM. Big Data for Forecasting Global Change Impact on Plant Communities. Global Ecology and Biogeography. 2017;26 (1):6-17.

35. Kljun N., Black T.A., Griffis T.J., Barr A.G., Gaumont-Guay D., Morgenstern K., McCaughey J.H., Nesic Z. 2007. Response of Net Ecosystem Productivity of Three Boreal Forest Stands to Drought // *Ecosystems*. Vol. 10. P. 1039-1055.
36. 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. P. 309-350.
37. Montgomery D.C., Peck E.A. 1982. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons. 300 p.
38. Paris Agreement. 2015. Conference of the Parties Twenty-first Session. Paris, 30 Nov. to 11 Dec., 2015. 19 p.
39. 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*. Vol. 16. P. 123-146.
40. Stinson G., Kurz W.A., Smyth C.E., Neilson E.T., Dymond C.C., Metsaranta J.M., Boisvenue C., Rampley G.J., Li Q., White T.M., Blain D. 2011. An Inventory-based of Canada's Managed Forest Carbon Dynamics, 1900 to 2008 // *Global Change Biology*. Vol. 17. P. 2227-2244.
41. Thompson I., Mackey B., McNulty S., Mosseler A. 2009. Forest Resilience. Biodiversity and Climate Change: A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems // *Technical Series*. Vol. 43. P. 1-67.
32. Gauthier S, Bernier P, Kuuluvainen T, Shvidenko AZ, Schepachenko DG. Boreal Forest Health and Global Change. *Science*. 2015;349 (6259):819-821.
33. Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Climate Simulations for 1880-2003 with GISS Model E. *Climate Dynamics*. 2007;29:661-696.
34. Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2002:560.
35. Kljun N, Black TA, Griffis TJ, et al. Response of Net Ecosystem Productivity of Three Boreal Forest Stands to Drought. *Ecosystems*. 2007;10:1039-1055.
36. 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, 1998:309-350.
37. Montgomery DC, Peck EA. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982:300.
38. Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session, Paris, 30 Nov. to 11. Dec., 2015. 2015:19.
39. Pope VD, Gallani ML, Rowntree PR, Stratton RA. The Impact of New Physical Parametrizations in Hadley Centre Climate Model – HadCM3. *Climate Dynamics*. 2000;16:123-146.
40. Stinson G, Kurz WA, Smyth CE, et al. An Inventory-based of Canada's Managed Forest Carbon Dynamics, 1900 to 2008. *Global Change Biology*. 2011;17:2227-2244.
41. Thompson I, Mackey B, McNulty S, Mosseler A. Forest Resilience. Biodiversity and Climate Change: A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems. *Technical Series*. 2009;43:1-67.

UDC 57.574 + 91.911.913.929

**DEVELOPMENT OF THEORY AND METHODS OF MONITORING  
FOREST ECOSYSTEMS UNDER GLOBAL CLIMATE CHANGE  
(RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH)**

© 2026. E.G. Kolomyts

*Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences  
2, Institutskaya Str., 142290, Pushchino, Russia. E-mail: egk2000@mail.ru*

Received February 26, 2026. Revised March 01, 2026. Accepted March 02, 2026.

The paper examines the prospects for implementing the full triad of geoeological monitoring: observation (state assessment) – control (forecasting) – management (adaptation, regulation). Conceptual principles are proposed for an empirical-simulation method of landscape-ecological forecasting of forest ecosystems, revealing the local and regional mechanisms of their global changes. Paths for developing a new predictive geo-ecological concept, known as “Global Changes at the Local Level”, are substantiated, identifying these changes through an empirically established mapping of the background bioclimatic trend by the catenary system of forest biogeocoenoses, which makes this study a novelty. The ordination analysis of landscape connections aims to identify the transitions of forest communities to critical states based on the main discrete parameters of biological turnover. The landscape-ecological forecast is presented as a system of operations with the ecological (hydrothermal) niches of the studied objects. Empirical-simulation predictive modeling is described as the reproduction of future scenarios of biogeocoenotic systems according to the laws of their basic spatial organization. A methodology developed by the author for quantitatively assessing the resilience of forest ecosystems is presented. The mechanisms of adaptation of forest ecosystems to global climate signals are examined through the prism of their functional resilience to the impact of these signals. The ecological resources of forest cover are described in the biotic regulation of the carbon cycle, aimed at mitigating global warming, as well as in ensuring the transition to adaptive forestry.

*Keywords:* global warming, forest geo(eco)systems, geo-ecological monitoring, empirical-simulation predictive modeling, forest ecosystem resilience, quantitative methods of ecological analysis, carbon cycle, forest ecological resources, global warming mitigation.

**DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-93-116**

**EDN: VJGNPO**