

## ГЕОСИСТЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ: ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

© 2025 Э.Г. Коломыц

Институт фундаментальных проблем биологии Пущинского научного центра РАН,  
г. Пущино (Россия)

Поступила 08.11.2025

*Аннотация.* Изложена стратегия изучения механизмов функциональной и структурной организации лесных экосистем как объектов наземного геосистемного мониторинга. Познание локальных механизмов глобальных изменений осуществляется через эмпирическую имитацию регионального биоклиматического тренда геосистемами локального уровня. Стратегия поиска представлена в форме экспериментального геоэкологического анализа, с реализацией полной триады мониторинга «состояние–прогноз–управление». Основное внимание уделяется выявлению климатогенных изменений трех инвариантных функциональных параметров лесных биогеоценозов: 1) тесноты межкомпонентных связей как индикатора территориальной целостности гео(эко-)системы; 2) дискретных показателей метаболизма и, прежде всего, первичной продуктивности, характеризующей эффективность использования фитобиотой ресурсов среды; 3) параметров функциональной устойчивости гео(эко)систем (лабильной фитоценотической и инерционной почвенно-биотической) как интегральных показателей их экологического резерва и адаптивного потенциала в меняющемся климате. Охарактеризованы идеологические и научно-методические аспекты рабочей концепции геосистемного мониторинга, а также разработанные автором методы базового и прогнозного эмпирико-статистического моделирования функциональных и структурных характеристик лесных экосистем. Планируется проведение численных экспериментов с гидротермическими нишами биогеоценозов по климатическим трендам прошлого и будущего. Описан рабочий алгоритм геосистемного мониторинга лесов, в котором инструментом анализа служит скользящая (маятниковая) операционная система, с неоднократным повторением стадий наблюдения и прогноза (на фоне идущих климатических трендов) и с выявлением экологических эффектов управляющей обратной связи, в частности, роли углеродного баланса лесных экосистем в смягчении глобального потепления. Стратегия научного поиска предполагает периодически возвратную последовательность выполнения элементов триады геосистемного мониторинга «наблюдение–прогноз–управление», с построением эмпирико-статистических моделей перехода экосистем «из прошлого в будущее». Должен проводиться периодический контроль (верификация) прогнозируемых расчетных параметров состояния лесных экосистем (продуктивности, устойчивости, углеродного баланса и др.) по эмпирическому материалу ландшафтных съемок данного года, который окажется гидротермическим аналогом определенного интервала прогнозируемого климатического тренда.

*Ключевые слова:* глобальное потепление, лесные экосистемы, геосистемный мониторинг, базовое и прогнозное эмпирико-статистическое моделирование.

### Введение

Согласно решениям Конференции ООН по окружающей среде и развитию, состоявшейся в Рио-де-Жанейро в 1992 году, стратегией устойчивого развития открытого образования является сохранение природно-ресурсного потенциала природных экосистем, в первую очередь, их биотических компонентов, для удовлетворения жизненных потребностей нынешнего и будущих по-

колений. Для решения проблем устойчивого развития необходимы, прежде всего, индикаторы устойчивого развития элементов и систем окружающей среды. Это составляет предмет и задачи геоэкологического мониторинга.

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. Лесные экосистемы –

---

Коломыц Эрланд Георгиевич, докт. геогр. наук, проф.,  
ведуш. науч. сотр., [egk2000@mail.ru](mailto:egk2000@mail.ru)

наиболее мощный регулятор и стабилизатор природных биогеохимических круговоротов (Сукачев, 1972), в том числе углеродного цикла и тесно связанного с ним температурного режима атмосферы (Горшков, 1995). Лесной покров России составляет около 20% лесов планеты, причем бореальные леса занимают более 90% этой площади. Таким образом, проблема сохранения лесных экосистем и воспроизводства лесных ресурсов на южной границе умеренной лесной зоны, где лесные сообщества находятся в состояниях, близких к критическим, относится к числу фундаментальных экологических проблем. Эта проблема становится актуальной в условиях начавшегося глобального потепления с его весьма разнообразными и порой трудно предсказуемыми экологическими последствиями.

### Состояние проблемы

В последние десятилетия активно изучаются возможные функциональные и структурные преобразования природных экосистем и их компонентов под влиянием антропогенных изменений климата, в том числе современного глобального потепления как актуальной экологической проблемы человечества (Kljun et al., 2007; Beets et al., 2011; Израэль и Рябошапко, 2011; Замолодчиков, 2011; Franklin et al., 2017; Романовская, 2019; Леса России ..., 2020; и др.).

Значительный прогресс был достигнут в разработке комплексных глобальных рамок мониторинга для обнаружения прогресса изменений окружающей среды. Однако экстраполяция методов глобального мониторинга системы «океан-атмосфера-континент» на региональный и, особенно, локальный уровни сталкивается со значительными фактическими и методологическими трудностями. Здесь необходимо разрабатывать свои независимые методы мониторинга.

Согласно концепции Герасимова–Израэля, 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 подчеркивал, что мониторинг в полном объеме должен включать не только «слежение» (повторные наблюдения), но и «...также оценку и прогноз состояния окружающей среды... и контроль качества окружающей среды» (1984, с. 11-12), т.е. реализацию всей его операционной триады (см. выше).

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 (Beets et al., 2011; Franklin et al., 2017; и др.). В России также проведены многочисленные эксперименты по изучению влияния современных климатических условий на состояние, фенологию и тенденции развития растительных сообществ в разных регионах (Гордиенко, 2017; Иванова, Скок, 2019; Кухта, Попова, 2020; Максимова и др., 2021; Соловьев, Шихова, 2021; и др.).

Достаточно информативными оказались работы второго этапа мониторинга – по региональному и планетарному эколого-географическому прогнозу, а также по прогнозированию углеродного баланса лесов (Кобак и др., 2002; Коломыц, 2008; Tchebakova et al., 2009). Описаны глобальный углеродный цикл и парниковый эффект атмосферы в голоцене и в современный период. Оценены возможные изменения продуктивности растительности России в XXI веке на основе ее современной геофизической ординации (Голубятников и др., 2005). Разработаны прогнозные модели углеродного баланса лесов России на основе комплексной наземной и спутниковой информации (Замолодчиков и др., 2011; Швиденко, Щепашенко, 2014; и др.).

Третий, заключительный этап мониторинга: управление (регулирование) – находится еще в состоянии предлагаемых определений, концептуальных гипотез и предлагаемых научно-методических программ. Следует отметить предлагаемую концепцию «климатической геоинженерии» с целью предотвращения катастрофических экологических последствий глобального потепления (Израэль, Рябошко, 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 сценариях углеродного бюджета циркумполярных бореальных лесов Евразии и Северной Америки (Gauthier et al., 2015; Швиденко и др., 2017).

Для достижения целей, предусмотренных Парижским Соглашением (Paris Agreement, 2015) по изменению климата, предлагается концепция «мониторинга адаптации», которая расширяет существующую систему климатического мони-

торинга (Романовская, 2019). Рассматриваются ожидаемые воздействия климатических изменений на леса России и механизмы адаптации лесов для использования последних в качестве средств смягчения климатических сигналов (Швиденко, Щепаченко, 2014; Швиденко и др., 2017).

В целом, конкретное решение экологических проблем для оценки роли лесов в смягчении глобального потепления пока не получило широкого распространения. Соответственно, немногочисленные исследования потенциала этого смягчения посредством лесного хозяйства (Швиденко и др., 2017). До сих пор еще поднимаются вопросы устойчивого лесоуправления и лесовосстановления для смягчения последствий изменения климата и для развития «лесной биоэкономики замкнутого цикла» (Леса России ..., 2020).

Итак, каждая из трех триад геоэкологического мониторинга уже получила самостоятельную научную и методическую разработку, однако интеграция всех этих результатов в единую оперативную систему мониторинга остается весьма проблематичной. Рамочная идея полной триады геоэкологического мониторинга, провозглашенная более 50 лет назад, до сих пор не реализована. Осталась нерешенной задача реализовать полный цикл климатогенного мониторинга лесов «наблюдение–контроль–управление» на примере конкретного экорегиона, с разработкой единой системы моделирования состояния лесных экосистем в прошлом, настоящем и будущем, а также соответствующих прямых и обратных связей между лесами и климатом.

Научно-методические подходы к решению этой проблемы изложены в данном сообщении. Развиваются представленные ранее автором (Коломыц, 2001, 2008) научно-методические аспекты *геосистемного мониторинга*. Новым является описание этих аспектов в форме *экспериментального ландшафтно-экологического исследования*, с реализацией полной триады мониторинга «наблюдение–прогноз–управление». Проблема *климатогенного геосистемного мониторинга лесов* освещается на основе эмпирически устанавливаемых локальных и региональных ландшафтных связей, которые рассматриваются в качестве механизмов метаболической реакции лесных биосистем на климатические тренды, в том числе на современное глобальное потепление.

### **Общее направление научного поиска**

Если для слежения за общими климатогенными изменениями состояния зонально-региональных типов природной среды широко используются методы дистанционного космического зон-

дирования, с применением геоинформационных технологий (Барталев и др., 2016; Franklin et al., 2017; и др.), то «... методология традиционных полевых наблюдений ... остается наилучшей для мониторинга постепенной трансформации фитоценозов, включая экзогенные сукцессии» (Израэли др., 1993, с. 11). Будучи территориально достаточно ограниченными, наземные исследования дают несоизмеримо более разнообразный и глубокий по своему содержанию материал по сравнению с данными сканирующих радиометров при спутниковом зондировании лесного покрова обширных территорий. К тому же обнаружено, что содержание карт дистанционного зондирования по глобальному пулу биомассы лесов имеет отклонения от данных инвентаризации до 120% (Santoro et al., 2021). Тем не менее, на каждом этапе мониторинга при анализе материалов наземных работ целесообразно использовать результаты дистанционного зондирования лесов изучаемой территории. Наглядным примером может служить организованная в Центрально-Лесном биосферном заповеднике система многолетних ландшафтно-экологических исследований, сочетающих в себе полевые измерения и обработку дистанционной информации (Желтухин и др., 2021).

Одним из наиболее перспективных направлений исследований в области климатогенного геосистемного мониторинга может быть постановка серии экспериментов по изучению механизмов локального отклика на глобальные и региональные гидроклиматические сигналы, с выявлением системы передаточных и трансформирующих функций в ландшафтных связях. Экотонный спектр природных зон, охватывающий основной водосбор Волжского бассейна – весьма благоприятная модельная территория для проведения таких экспериментов.

Ландшафтно-экологический подход к разработке геосистемного мониторинга рассматривает природные комплексы локального (топологического) уровня (ландшафтные фации, или биогеоценозы) в качестве исходных объектов анализа. Стратегическая цель этих исследований состоит в развитии – применительно к обширной зоне перехода от бореального пояса к поясу суббореальному – прогнозной топо-экологической концепции «Глобальные изменения на локальном уровне» как научно-методической основы локального геосистемного мониторинга глобальных изменений (Коломыц, 2008, 2024а). Продуктивное значение этой концепции состоит в том, что биогеоценоз как элементарная ячейка биогеохимической работы биосферы (Тимофеев-Ресовский, 1970) представляет собой «... первичный аппарат энергетического и материально-

го обмена» (Сочава, 1974, с. 5) и, следовательно, наиболее дробное проявление системной общности различных природных компонентов, возникающей на основе закономерностей, действующих на земной поверхности. Локальное геосистемное моделирование осуществляется по материалам крупномасштабных ландшафтных съемок, проводимых на специально подобранных экспериментальных полигонах (Коломыц, 2008). Весь спектр пробных площадей на каждом полигоне должен охватывать свойственное данному экорегиону основное разнообразие геоморфологических условий и почвенно-фитоценологических структур. Одним из перспективных направлений исследований может быть постановка серии экспериментов по изучению механизмов локального отклика на фоновые гидроклиматические сигналы, с выявлением системы передаточных и трансформирующих функций в ландшафтных связях.

Рациональная система геоэкологического мониторинга должна базироваться на уже имеющихся достижениях в практике изучения и регулирования состояния окружающей среды (Израэль и др., 1981). Отправной точкой научного поиска по климатогенному мониторингу могут служить нижеследующие теоретические и методические разработки локальных и региональных ландшафтно-экологических прогнозов (Коломыц, 2008, 2018, 2020).

1. Установлено, что для равнинных и низкоргорных территорий умеренного пояса замыкающими звеньями в системе региональных связей гидротермических параметров являются *летние запасы продуктивной влаги в почве*, которые служат *основным каналом передачи климатических сигналов на структуру и функционирование фитоценологических и почвенных объектов*. Обнаружены высокие корреляции летнего влагосодержания почвы с двумя параметрами глобальных и региональных климатических прогнозов: со средней температурой июля (а также температурой теплого периода) и годовым количеством осадков (соответственно обратная и прямая экспоненциальные зависимости).

2. При прогнозных оценках на первые несколько десятков лет с точки зрения времен релаксации объектов первостепенное внимание должно быть уделено не структурным преобразованиям гео(эко-)систем, а *направленной смене их функционирования*. Речь идет об изменениях скорости малого биологического круговорота и о переходе экосистемы на новый уровень сбалансированности продукционной и детритной ветвей метаболизма. Такие процессы занимают в таежной зоне первые несколько лет, а в подзоне широколиственных лесов завершаются в те-

чение года. Эти характерные времена функциональной релаксации примерно соответствуют продолжительности углеродного цикла в лесных фитомассах (живых и мертвых) и мобильном гумусе почвы. *Функциональная релаксация* (сдвиги в малом биологическом круговороте) как первоочередная реакция экосистем на внешнее воздействие является *приоритетным объектом ландшафтно-экологического прогнозирования и в целом мониторинга*.

### **Объекты и методы моделирования**

В климатогенной динамике лесных экосистем кардинальными являются переходы их в критическое состояние. Такие переходы наиболее отчетливо проявляются в форме *цепных реакций в системе межкомпонентных и межкомплексных ландшафтных связей*. Важнейшими звеньями этих связей служат показатели первичного продукционного процесса и разложения мертвого органического вещества. Чем ниже ранг геосистемы, тем сложнее структура окружающей ее среды (Сочава, 1974), поэтому следует ожидать, что цепные реакции наиболее отчетливо проявляются именно на локальном уровне. Чтобы выявить множество таких реакций, необходимо располагать массовым эмпирическим материалом, который может быть получен в результате *крупномасштабных ландшафтных съемок на специально подобранных для этого модельных полигонах* (Коломыц, 2008). Весь спектр пробных площадей на каждом полигоне должен охватывать свойственное данному экорегиону основное разнообразие геоморфологических условий и почвенно-фитоценологических структур.

В мониторинге ландшафтного уровня рекомендуется использовать следующие эмпирико-статистические модели: 1) теоретико-информационные модели, вскрывающие тесноту межкомпонентных связей, каналы цепных реакций на внешние возмущения и систему экологических ниш фитоценозов, почв и самих биогеоценозов в пространстве абиотических факторов среды; 2) теоретико-множественные модели (класс моделей дескриптивных, т.е. «размытых», множеств), описывающие с помощью мер сходства–контрастности и мер включения структуру вещественно-энергетических полей и материальных объектов.

Помимо этого, можно предложить *комплексные дискретные модели состояния лесных экосистем*, которые строятся путем сочетания информационных и теоретико-множественных методов анализа (Коломыц, 2018). Сначала проводятся теоретико-множественные вычисления мер нетранзитивных отношений между объектами, а затем – информационно-статистические расче-

ты разнообразия этих отношений в пределах данного биогеоэкологического пространства. По матрицам отношения включения данного объекта с другими объектами изучаемого типологического ряда рассчитываются два комплексных параметра его состояния: 1) *структурный и метаболический индексы объекта*, т.е. индексы доминирования, характеризующие общий уровень его структурного и/или функционального развития; 2) *показатель значимости объекта в данном геопространстве*, отображающий запас его гомеостатичности, согласно (Арманд, 1989). По первому параметру удается ввести меру, по которой проводится выделение структурных и метаболических экотипов растительных сообществ и в целом биогеоценозов. Второй же параметр дает общее представление об их сукцессионно-восстановительном потенциале при внешнем воздействии.

Ландшафтно-экологический прогноз основан на сочетании обоих типов моделирования. Путем теоретико-множественных операций с экологическими нишами рассматриваемых объектов ведутся прогнозные расчеты климатогенных изменений этих объектов на заданные сроки. В прогнозном аспекте анализ межкомпонентных и межкомплексных связей должен быть направлен, прежде всего, на оценку чувствительности локальных геосистем и их отдельных признаков к изменениям климата. Главная задача – выявить механизмы функционирования почвенно-фитоценозического «ядра» геосистем как передаточного звена трансформации геофизических сигналов.

Механизмы адаптации лесных экосистем к глобальным климатическим сигналам целесообразно рассмотреть через призму их устойчивости к воздействию этих сигналов. На основе дискретных параметров биологического круговорота уже разработаны количественные методы расчета и картографирования *функциональной устойчивости лесных экосистем как целостных биохорологических единиц* (Коломыц и др., 2015). С помощью метрики евклидова расстояния проводятся расчеты индексов мобильной (фитоценозической) и инерционной (почвенно-биотической) устойчивости двух типов: резистентной и упруго-пластичной. Это позволяет выявить метаболическое разнообразие указанных типов устойчивости как одну из характеристик мониторинга адаптации.

Весьма эффективным методом исследования служат построение и анализ *факторально-динамических, или парагенетических, рядов ландшафтных фаций*, представляющих собой определенный способ упорядоченности их структурных и режимных параметров в пространст-

венных и/или временных координатах (Сочава, 1974; Мильков, 1981). Для построения таких рядов необходимо пользоваться системой отсчета от некоторого типа местоположения, принятого за нулевое. Начать систему отсчета целесообразно с признаков *плакорной* группы фаций (Высоцкий, 1960), которая в максимальной степени отвечает зонально-региональной норме данной территории и, таким образом, является «внутриландшафтным ядром» ее физико-географического фона (Сочава, 1974). Среди локальных эдафических факторов, преломляющих данный физико-географический фон, выделяются два ведущих – процессы лито- и гидроморфизации. Эти факторы последовательно замещают друг друга при соответствующей смене типов местоположения. Они используются в качестве приоритетных признаков при выделении различных биогеоценологических групп в каждой региональной геосистеме.

#### **Рабочий алгоритм геосистемного мониторинга**

Опишем кратко предлагаемую стратегию выполнения исследовательской триады геосистемного мониторинга – «наблюдение–прогноз–управление».

**1. Наблюдение (оценка состояния).** Начальный этап мониторинга должен быть целенаправленным, обеспечивающим решение центральной задачи – успешного геоэкологического прогнозирования. Первый шаг к познанию локальных механизмов глобальных изменений осуществляется через методическую конструкцию с рабочим названием *«эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда экосистемами локального уровня»*. С этой целью на примере крупномасштабных экспериментальных полигонов, характеризующих различные экорегионы (Коломыц, 2008) выявляются закономерности преломления зонально-регионального биоклиматического фона местными геоморфологическими и гидроэдафическими факторами. В результате такого преломления формируются *региональные системы локальной зональности*, состоящие из векторных рядов плакорных биогеоценозов, отражающих зонально-региональный фон данной территории, и экстразональных топогеосистем (Мильков, 1981) как представителей других зональных типов географической среды, нередко весьма удаленных. Эти пространственно упорядоченные системы адекватны вектору прогнозируемых изменений климата (рис. 1) и поэтому способны имитировать основные направления и масштабы экосистемных перестроек, создавая тем самым эмпирическую основу для прогнозных построений.

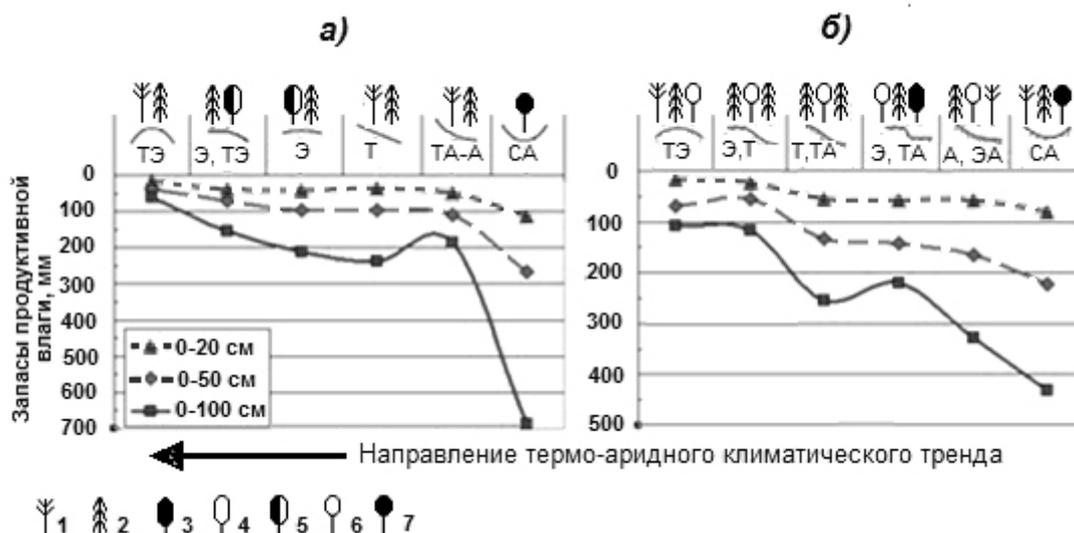


Рис. 1. Распределение таксономических норм среднеиюльских запасов продуктивной влаги в слоях почвы 0–20, 0–50 и 0–100 см почве различных групп лесных биогеоценозов в системе их катенарной организации, адекватной термоаридному климатическому тренду.

Экорегiónы Среднего Поволжья (Коломыц, 2024б): (а) – северная граница широколиственно-лесной подзоны на Приволжской возвышенности (полигон «Зеленый Город»); (б) – южная полоса подтаежной зоны в Низменном Заволжье (полигон «Керженец»). Локальные типы местоположений: Э – элювиальный (плакорный); ТЭ – трансэлювиальный, Т – транзитный; ТА – трансаккумулятивный; А – аккумулятивный; СА – супераккумулятивный; ЭА – элювиально-аккумулятивный.

Fig. 1. Distribution of taxonomic norms of average July productive moisture reserves in the 0–20, 0–50, and 0–100 cm soil layers of different groups of forest biogeocenoses in the system of their catena-ry organization adequate to the thermoarid climatic trend.

Ecoregions of the Middle Volga region (Kolomyts, 2024b): (a) – northern boundary of the broadleaf forest subzone on the Volga Upland (Green City testing site); (b) – southern strip of the subtaiga zone in the Lowland Trans-Volga region (Kerzhenets testing site). Local location types: E – eluvial (upland); TE – transeluvial, T – transit; TA – transaccumulative; A – accumulative; SA – supraquatic; EA – eluvial-accumulative.

Таблица 1. Распределение групп биогеоценозов Приокско-Тerrasного заповедника по их зонально-географическим группам.  $K(A;B) = 0,212$ .

Table 1. Distribution of biogeocenoses groups of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve by their zonal-geographical groups.  $K(A;B) = 0.212$ .

Зонально-географические Группы биогеоценозов	Группы биогеоценозов (Коломыц, 2008)					
	1	2	3	4	5	6
Бореальная таежная		2,57 ● X		1,00	1,29 ●	1,29 ●
Бореальная боровая	2,81 ● X			0,63		2,41 X
Неморально-бореальная	2,81 ● X				1,61 X	1,61 ●
Бореально-неморальная		1,61 ●	2,41 X	0,63	1,21 X	0,40
Неморальная		0,80	0,80	3,13 X	0,80	

← Общее направление термоаридного климатического тренда

**Примечание:**  $K(A;B)$  – нормированный коэффициент межкомпонентной сопряженности, по (Пузаченко, Скулкин, 1981). Символом «X» обозначена область экологического доминанта; градации, показанные символом «●», образуют «размытую» часть климатической ниши.

**Note:**  $K(A;B)$  is the normalized coefficient of intercomponent contingency, according to (Puzachenko, Skulkin, 1981). The symbol “X” denotes the region of the ecological dominant; the gradations shown by the symbol “●” form the “blurred” part of the climatic niche.

С точки зрения климатогенных изменений природных сред нас интересуют гидротермические ряды топоэкосистем, а также их отдельных компонентов, в направлении их возрастающей аридности или, наоборот, гумидности. При этом каждый такой ряд может быть представлен как некоторый аналог временного ряда топоэкосистем, соответствующего вектору фоновых климатических изменений – тренду (табл. 1). Таким образом, мы получаем *эргодическую операционную систему*. Исходя из свойств самоподобия этой системы, мы заменяем пространственные последовательности на временные и, анализируя векторный ряд плакорно-экстразональных топоэкосистем, проводим своего рода *имитацию локального отображения фонового климатического тренда*, на основе чего выявляем реальный спектр возможных направлений функционально-структурных переходов между экосистемами.

Оценка *климатогенной смены состояний лесных* биогеоценозов проводится сначала парциально по отдельным фитоценотическим и почвенным характеристиками. В дальнейшем возникает необходимость «... приведения изменений всех этих разнохарактерных величин к каким-либо одним единицам с целью получения обобщенной, суммарной оценки изменения состояния экосистем» (Израэль и др., 1981, с. 12). Критериями таких оценок могут служить «... отсутствие снижения продуктивности, стабильность и разнообразие системы» (Израэль, 1984, с. 15).

Комплексный (ландшафтный) мониторинговый анализ может быть представлен анализом климатогенных изменений следующих *трех инвариантных показателей* структурно-функциональной организации биогеоценозов: 1) степени связности их моносистемной пространственной организации, т.е. тесноты межкомпонентных связей (прежде всего связей биотических компонентов с характеристиками абиотической среды) как показателя территориальной целостности геосистемы; 2) дискретных показателей метаболизма, и прежде всего первичной продуктивности, характеризующих эффективность использования фитобиотой вещественно-энергетических ресурсов среды и соответствующий уровень сбалансированности биологического круговорота (Герасимов, 1985); 3) параметров функциональной устойчивости гео(эко-)систем (Коломыц и др., 2015): лабильной (фитоценотической) и инерционной (почвенно-биотической) – выступающих как интегральные показатели их экологического резерва, или ассимилиционной емкости (Израэль, 1984), определяющие поведение фитобиоты и органического вещества почвы в меняющейся абиотической среде. Климатогенная трансформация перечисленных инвариант-

ных функциональных показателей лесных биогеоценозов должна описывать картину соответствующего нарушения достигнутого ими ранее экологического равновесия.

Из двух главных метаболических циклов, определяющих функциональный изоморфизм – водно-балансового и биогеохимического – явный приоритет остается за вторым циклом. Как показал региональный информационный анализ (Коломыц, 2024б), структурная перестройка экосистем на три четверти определяется сдвигами в малом биологическом круговороте и лишь на одну четверть зависит от изменений режимов тепло-влагообмена. В этом состоит основной механизм воздействия функциональной релаксации экосистем на релаксацию структурную. При внешнем возмущении экосистема «выбирает» ту траекторию своих структурных преобразований, которая отвечает наименьшим изменениям процессов ее функционирования и которая тем самым быстрее обеспечивает ей новую устойчивость.

Первым шагом осуществления геосистемного мониторинга является вычленение климатогенных структурно-функциональных изменений ( $\Delta Q_{\text{клим}}$ ) параметров состояния данной группы лесных биогеоценозов из общей суммы этих изменений ( $\Delta Q_{\text{сум}}$ ), произошедших за предшествующий период времени. Для этого необходимо знать величину имевших место за предшествующий период времени возрастных сдвигов в параметрах состояния биогеоценозов ( $\Delta Q_{\text{возр}}$ ). Такие сдвиги можно установить, используя материалы базовых ландшафтно-экологических съемок (см. выше). Эти сдвиги включают в себя две основные составляющие: а) сукцессионный (самовосстановительный) тренд лесного сообщества; б) динамику межвидовых и межпопуляционных взаимодействий в лесном биогеоценозе. Процедура вычленения структурно-функционального экзогенеза имеет вид:

$$\Delta Q_{\text{клим}} = \Delta Q_{\text{сум}} - \Delta Q_{\text{возр}}. \quad (1)$$

Здесь проводится операция алгебраического вычитания, с учетом знака каждого члена правой части уравнения. Например, если полученная суммарная мера  $\Delta Q_{\text{сум}}$  изменений связности моносистемной организации лесных биогеоценозов положительна, а возрастные изменения этой меры отрицательны, но с меньшими абсолютными значениями, то искомая величина  $\Delta Q_{\text{клим}}$  окажется положительной. В случае соотношения абсолютных значений ( $-\Delta Q_{\text{сум}} > +\Delta Q_{\text{возр}}$ ) расчетная модель покажет отрицательную величину климатогенных изменений меры межкомпонентной связности биогеоценозов. В другом

случае отрицательный экологический эффект климатического сигнала может быть перекрыт положительной сукцессионно-восстановительной тенденцией и тогда получим  $+(\Delta Q_{\text{сум}})$ . И наоборот, при  $\Delta Q_{\text{сум}} < \Delta Q_{\text{возр}}$  (по модулю) мы всегда будем иметь отрицательные значения параметра  $\Delta Q_{\text{клим}}$ .

**2. Прогноз (контроль).** Автором разработана методика численного ландшафтно-экологического прогнозирования (Коломыц, 2008, 2018). Основной принцип ландшафтно-экологического прогноза 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 согласно данному геофизическому тренду.

Подчеркнем экспериментальный характер этой методики. В расчетных моделях ход прогнозируемых процессов воспроизводится с помощью их эмпирической имитации пространственно распределенными параметрами базовых экологических ниш изучаемых объектов. Исследователь задает входные параметры в операционную систему и получает на выходе картину прогнозируемых функциональных состояний изучаемых объектов в данной статистической выборке. Проводится сценарный прогнозно-экологический анализ сети межкомпонентных и межкомплексных связей как системы преобразования фоновых ландшафтно-геофизических сигналов и передачи их с глобального и/или регионального уровней на уровень локальный. Сценарии возмущающих воздействий могут задаваться по тому или иному варианту глобально-климатического прогноза на различные сроки.

Прогноз осуществляется по материалам *многолетней серии повторных ландшафтных съемок* на изучаемой территории (см. выше). Исходная (базовая) съемка включает полный набор структурно-функциональных характеристик лесных биогеоценозов (Коломыц, 2008). В последующие годы съем информации может ограничиться продуктивностью напочвенного растительного покрова, а также температурой и влажностью почвы. Это те функциональные параметры лесного биогеоценоза, которые практически мгновенно реагируют на сигналы фоновой климатической системы. Именно они могут быть использованы для расчета изменений продуктивности лесов и их углеродного баланса при грядущих межгодовых климатических коле-

баниях. Последние предоставляют нам своего рода окошки в будущие климатические ситуации, когда та или иная аномалия может стать многолетней нормой. Таким образом, *эмпирическая имитация функционального отклика лесных экосистем на длительнопериодные колебания климата* способна служить важным методическим приемом на прогнозной стадии геосистемного мониторинга. Опыт подобного эмпирико-имитационного прогнозного моделирования изложен в работах (Коломыц, 2018, 2020).

На рис. 2 приведены примеры прогнозных ландшафтно-экологических сценариев для двух экорегионов Среднего Поволжья (южной подтайги и типичной лесостепи) по умеренной (E GISS) и экстремальной (HadCM3) климатическим моделям. По первой модели реализуется прогноз, предусмотренный Парижским Соглашением (Paris Agreement, 2015) – не допустить повышения глобальной температуры к 2050 г. более чем на 1,5–2°C. Прогноз же по второй модели адекватен современному беспрецедентно высокому глобальному потеплению (Ранькова и др., 2024).

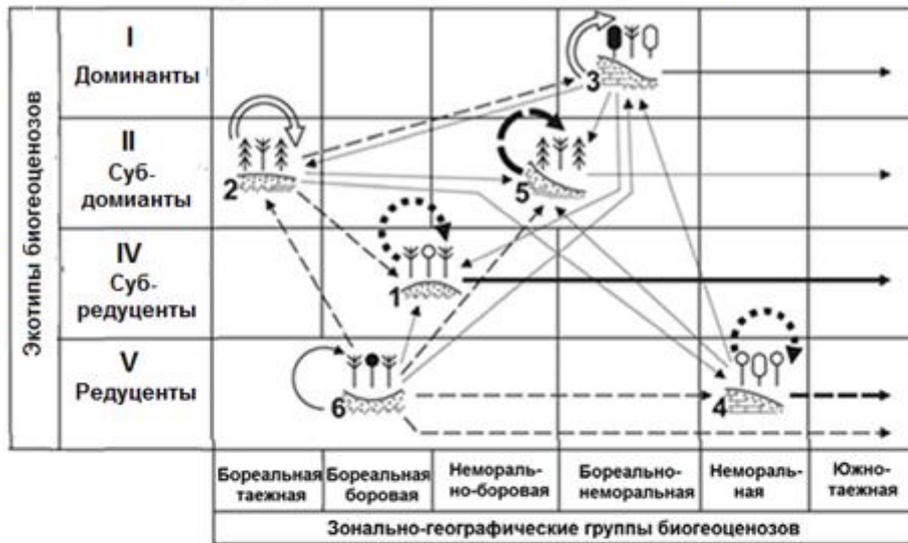
При умеренном термоаридном сигнале в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике лесные биогеоценозы почти всей катенарной системы на 55–80% остаются в своем базовом функционировании, а вероятности межфациальных переходов не превышают 25–35% (см. рис. 3, а). Экстремальный климатический сигнал полностью нарушает функциональную устойчивость всех биогеоценологических групп (см. рис. 3, б). В Присурье боровые сосняки с елью и сосново-широколиственные леса (группы фаций 1 и 2) должны трансформироваться (соответственно, на 80–90% и на 60–70%) сначала в южную лесостепь, а затем и в северную степь.

Прогнозные расчеты изменений каждого функционального параметра лесных экосистем проводятся по следующей схеме. Для каждого прогнозного срока общий сдвиг данного параметра ( $\Delta Q_{\text{сум}}$ ) складывается из его прогнозируемых климатически обусловленных сдвигов ( $\Delta Q_{\text{клим}}$ ) и изменений, обусловленных возрастной динамикой лесного сообщества за этот же период ( $\Delta Q_{\text{возр}}$ ):

$$\Delta Q_{\text{сум}} = \Delta Q_{\text{клим}} + \Delta Q_{\text{возр}}. \quad (2)$$

Как и на первом этапе мониторинга, здесь проводится операция алгебраического сложения, с учетом знака каждого члена правой части уравнения.

а) Приокско-Террасный заповедник, умеренная модель E GISS, прогноз на 2150 г.



б) Природный национальный парк "Чаваш Вармане" (Присурье), экстремальная модель HadCM3, прогноз на 2100 г.



Рис. 2. Региональные оргграфы взаимных функциональных переходов (согласно двум прогнозно-климатическим моделям) групп биогеоценозов, имеющих различные зональные признаки и находящихся на соответствующих уровнях базового функционирования (Коломыц, 2008). 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.

Fig. 2. Regional digraphs of mutual functional transitions (according to two climate forecast models) of groups of biogeocenoses with different zonal characteristics and located at the corresponding levels of basic functioning (Kolomyts, 2008).

Transition probabilities: 1 – 0.10 or less; 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.

Прогнозируемые сценарии парциальных и комплексных функциональных параметров лесных биогеоценозов могут быть верифицированы эмпирическим материалом. В табл. 2 приведен пример такой верификации по общей продуктивности для некоторых лесных сообществ в Приокско-Террасном биосферном заповеднике, где были проведены крупномасштабные ландшафтные съемки в 1998 г. (Коломыц, 2019)

и в 2021 г. По данным соседней с заповедником ст. Кашира (по средним линейным трендам), в течение рассматриваемого периода глобально-го потепления (1998–2021 гг.) средние температуры теплого и холодного периодов года увеличились соответственно на 0,9° и 1,9°, в то время как прирост годовых осадков был незначительным – около 30 мм. Термо-аридизация вызвала определенное приращение продуктивности лесов

(что дали прогнозные расчеты), однако их реальная продуктивность снизилась из-за отрицательного влияния возраста насаждения. В таблице показаны также определенные расхождения

в изменениях климатогенной продуктивности лесов между ее расчетными (по климатическому прогнозу) и реальными (эмпирическими) значениями.

**Таблица 2. Пример расчетов климатогенной составляющей изменения общей продуктивности (РС) лесных сообществ по ее прогнозируемым, согласно климатической модели HadCM3, и реальным значениям в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике**

**Table 2. An example of calculations of the climatogenic component of changes in the total productivity (PC) of forest communities based on its predicted, according to the HadCM3 climate model, and actual values in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve**

Характеристики и годы		Группы растительных ассоциаций		
		1. Березово-сосновые леса, ксеро-мезофильные, разнотравные	2. Кленово-липово-дубовые леса, мезофильные, широкотравные	3. Березняки, мезо-ксерофильные, разнотравно-злаковые
Средневзвешенный (по породам) возраст леса, $\tau$ , лет	1998	65	74	57
	2021	88	97	75
Запас влаги в слое почвы 0–50 см, мм	1998	88	85	51
	2021	103	87	110
Удельная скорость изменения РС, т/га·год	1998–2021	– 0,139	– 0,140	– 0,139
Общая продуктивность леса, РС, т/га	1998	14,26 14,28	12,93 12,55	13,01 13,61
	2021	12,82 13,21	12,29 11,69	13,31 12,94
Изменения составляющих общей продуктивности (см. в тексте)	$\Delta PC_{\text{сум}}$	– 1,44 – 1,07	– 0,94 – 0,56	0,30 – 0,76
	$\Delta PC_{\text{возр}}$	– 3,20 – 3,20	– 3,22 – 3,22	– 3,19 – 3,19
	$\Delta PC_{\text{клим}}$	1,76 2,13	2,28 3,78	3,49 2,43

**Примечание.** В верхних строках таблицы приведены расчетные прогнозируемые изменения общей продуктивности лесов для различных групп растительных ассоциаций, а в нижних – ее реальные изменения.

**Note:** The top rows of the table show the calculated predicted changes in total forest productivity for different plant association groups, while the bottom rows show the actual changes.

**3. Управление (обратная связь).** Как уже говорилось, на основе геоэкологических прогнозов решается проблема *регулируемого качества природной среды*, т.е. определенного управления ею, с установлением эффектов допустимых воздействий, а также вероятностей риска тех или иных экологических последствий. С другой стороны, одним из важнейших направлений лесоводства, в том числе устойчивого управления лесами, является использование лесов в качестве средства смягчения климатических флуктуаций через посредство углеродного цикла (Швиденко и др., 2017).

Программа управления лесами Национального парка Сплит-Рок-Лайтхаус в штате Висконсин, США (Ontl et al., 2020) включает мероприятия, направленные как на поддержание существующего баланса углерода (защитные действия),

так и на повышение способности лесов улавливать углерод в будущем (наступательные действия). В систему адаптационных стратегий, в частности, входят: 1) сохранение или увеличение площади лесных земель и восстановление лесов после нарушений; 2) поддержание фундаментальных экологических функций леса путем действия его видового и структурного разнообразия; 3) сокращение потерь углерода в результате естественных нарушений, включая лесные пожары; 4) определение участков с наиболее высокой углеродной ценностью в ландшафте; 5) изменение видового состава и структуры леса для максимального увеличения запасов углерода.

Одним из эффективных направлений данного, заключительного, этапа геосистемного мониторинга может служить представленная в работе (Коломыц, 2020) концепция углеродных балан-

сов и функциональной устойчивости лесных экосистем при глобальных изменениях климата. В этой концепции описана поглощающая и адаптивная способность лесных, главным образом бореальных, биомов Европейской России в условиях современного антропогенного потепления. Научный поиск нами велся в соответствии с Парижским Соглашением по изменению климата (Paris Agreement, 2015). Приведем основные научно-методические результаты проведенных исследований, которые могут быть примером реализации данного этапа геосистемного мониторинга.

В качестве интегральной оценки динамического состояния системы «лес–климат» использована известная трактовка понятия *экологических ресурсов лесного покрова*, как его способность поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата (Горшков, 1995; Уткин, 1995). Эта регуляция направлена на возвращение окружающей среды в оптимальное для лесной экосистемы состояние, а также на сохранение относительной стабильности ее продукционного процесса, что обеспечивает и устойчивость механизмов самой регуляции углеродного цикла. Соответственно, одним из важнейших направлений устойчивого управления лесами является использование лесов в качестве средства смягчения климатических флуктуаций.

Разработаны алгоритмы расчетов углеродного баланса бореальных и неморальных лесных биогеосистем, а также объемов поглощения ими парниковых газов при прогнозируемых глобальных изменениях климата (Коломыц, 2020). Изложена процедура расчетов парциальных и суммарных значений содержания углерода в лесных ассоциациях и формациях для базового периода и прогнозируемых сроков на 100–200-летнюю перспективу. На основе материалов крупномасштабных ландшафтных съемок, проведенных в лесном поясе Волжского бассейна, осуществлена гидротермическая ординация содержания

углерода в различных пулах лесных биогеоценозов. Выявлены критические гидротермические состояния зональных типов лесов у южной границы лесного пояса, характеризующие их потенциальную адаптацию к кардинальным изменениям климата, с соответствующей адсорбцией/эмиссией парниковых газов.

Наконец, представлен прогнозный ландшафтно-экологический анализ лесного покрова Волжского бассейна, где освещена двуединая проблема – адсорбции и адаптации – входящая в перечень задач, поставленных Парижским (2015) Соглашением. Установлен адсорбционный потенциал коренных и производных бореальных и неморальных лесов, оценена их способность смягчать климатические изменения, в том числе снижать антропогенное потепление. Проведен численный эксперимент по оценке влияния упругой устойчивости лесных формаций на их углеродный баланс.

### Заключение

Изложенная стратегия научного поиска предполагает периодически возвратную последовательность выполнения элементов триады геосистемного мониторинга «наблюдение–прогноз–управление», с построением эмпирико-статистических моделей перехода экосистем «из прошлого в будущее» при каждом новом климатическом сигнале. Производится вычленение климатогенной составляющей из общего ряда прошедшей динамики лесных биогеосистем и затем дается прогноз их предстоящих изменений согласно дальнейшему гидротермическому тренду. Рабочим инструментом анализа служит своего рода *скользящая (маятниковая) операционная система*, где наблюдение и прогноз повторяются неоднократно – в соответствии с полученными экологическими результатами за предшествующий период изменений климата и с новыми гидротермическими сигналами, которые ожидаются в будущем.

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### Список русскоязычной литературы

Арманд А.Д. Критические состояния экосистем // Экосистемы в критических состояниях. М.: Наука, 1989. С. 23–31.

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: Ин-т космических исследований РАН. 2016. 208 с.

Высоцкий Г.Н. Избранные труды. М.: Сельхозгиз, 1960. 435 с.

Герасимов И.П. Экологические проблемы в прошлой, настоящей и будущей географии Мира. М.: Наука, 1985. 247 с.

Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Денисенко Е.А., Тихонов В.А. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005, Т. 41, № 1. С. 25–35.

Гордиенко Н.С. Современные тенденции изменений климата и биоты на Южном Урале // Пробл. экол.

мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. XXVIII, № 5. С. 87–99.

**Горшков В.Г.** Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. 470 с.

**Желтухин А.С., Курбатова Ю.А., Сандлерский Р.Б., Пузаченко М.Ю.** Стационарные исследования в Центральном-Лесном государственном природном биосферном заповеднике // *Вопр. геогр. Сб.* 152: Человек и биосфера. 2021. С. 357–378.

**Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н.** Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // *Лесоведение*. 2011, № 6. С. 16–28.

**Иванова Ю.Р., Скок Н.В.** Сезонное развитие растительных сообществ в контексте изменяющихся погодных условий низкогорий Среднего Урала // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 2019. Т. XXX. № 1–2. С. 70–85.

**Израэль Ю.А.** Экология и контроль состояния природной среды. Изд. 2-е, дополн. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 560 с.

**Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г.** Геоинженерия климата: возможности реализации // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 2011. Т. XXIV. С. 11–22.

**Израэль Ю.А., Семенов С.М., Хачатуров М.А.** Биоклиматологические аспекты комплексного глобального мониторинга // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. Т. XV. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 8–20.

**Израэль Ю.А., Филиппова Л.М., Инсаров Г.Э., Семевский Ф.Н., Семенов С.М.** Экологический мониторинг и регулирование состояния природной среды // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. Т. IV. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 6–19.

**Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Турчинович И.Е.** Влияние изменений климата на природную зональность и экосистемы России // *Изменения климата и их последствия*. СПб.: Наука, 2002. С. 205–210.

**Коломыц Э.Г.** Итоги и перспективы геосистемного мониторинга в Приокско-Террасном биосферном заповеднике // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2019, № 3. С. 41–56.

**Коломыц Э.Г.** Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.

**Коломыц Э.Г.** Мониторинг устойчивого развития лесных экосистем в меняющемся климате. М.: ИН-ФРА-М, 2024а. 547 с.

**Коломыц Э.Г.** Поиск механизмов глобальных изменений природной среды в целях геосистемного мониторинга // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2001, № 1. С. 28–32.

**Коломыц Э.Г.** Пути реализации единой триады регионального мониторинга в лесных экосистемах на современном этапе глобального потепления // *Успехи соврем. биол.* 2024б. Т. 144, № 1. С. 64–79.

**Коломыц Э.Г.** Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальных изменениях климата. Экологические ресурсы бореальных лесов. М.: Наука, 2020. 423 с.

**Коломыц Э.Г.** Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. М.: КМК, 2018. 716 с.

**Коломыц Э.Г., Керженцев А.С., Шарая Л.С.** Аналитические и картографические модели функциональной устойчивости лесных экосистем // *Успехи соврем. биол.* 2015. Т. 135, № 1. С. 127–149.

**Кухта А.Е., Попова У.Н.** Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 2020. Т. XXXII, № 3–4. С. 33–42.

Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука / ред. П. Лескинен, М. Линднер, П. Веркеркидр. Бонн: Европ. ин-т леса, 2020. 140 с.

**Максимова О.В., Минин А.А., Кухта А.Е.** О связи сезонных явлений и процессов у деревьев в условиях Центрально-Лесного биосферного заповедника // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 2021. Т. XXXII, № 1–2. С. 56–66.

**Мильков Ф.Н.** Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1981. 398 с.

**Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф., Антипина У.И., Смирнов В.Д.** Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2023 году // *Фунд. и прикл. климатология*. 2024. Т. 10, № 2. С. 288–323.

**Романовская А.А.** К концепции государственного управления и мониторинга в сфере изменений климата в России // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 2019. Т. XXX, № 3–4. С. 61–83.

**Соловьев А.Н., Шихова Т.Г.** Фенологические реакции биоты востока Русской равнины на погодные аномалии // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 2021. Т. XXXII, № 1–2. С. 37–55.

**Сочава В.Б.** Геотопология как раздел учения о геосистемах // *Топологические аспекты учения о геосистемах*. Новосибирск: Наука, 1974. С. 3–86.

**Сукачев В.Н.** Избранные труды. Том 1-й. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. 418 с.

**Тимофеев-Ресовский Н.В.** Структурные уровни биологических систем // *Сист. иссл. Ежегодник 1970*. М.: Наука, 1970. С. 80–113.

**Уткин А.И.** Углеродный цикл и лесоводство // *Лесоведение*. 1995, № 5. С. 3–20.

**Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г.** Углеродный бюджет лесов России // *Сиб. лесн. журн.* 2014, № 1. С. 69–92.

**Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Краксер Ф., Онучин А.А.** Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // *Сиб. лесн. журн.* 2017, № 6. С. 3–25.

#### **Общий список литературы / Reference List**

**Armand A.D.** Critical states of ecosystems // *Ecosystems in critical states*. Moscow: Nauka, 1989. P. 23–31. (in Russ.).

**Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O. et al.** Satellite mapping of the vegetation cover of Russia. Moscow: Space Research Inst. RAS. 2016. 208 p. (in Russ.).

**Vysotsky G.N.** Selected Works. Moscow: Selkhozgiz, 1960. 435 p. (in Russ.).

**Gerasimov I.P.** Environmental problems in the past, present and future geography of the World. Moscow: Nauka, 1985. 247 p. (in Russ.).

- Golubyatnikov L.L., Mokhov I.I., Denisenko E.A., Tikhonov V.A.** Model estimates of the impact of climate change on vegetation cover and carbon sink from the atmosphere // *Bull. AS. USSR. Physics of the atmosphere and ocean*. 2005. Vol. 41, No. 1. P. 25–35. (in Russ.).
- Gordienko N.S.** Modern trends in climate and biota changes in the Southern Urals // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modelling*. 2017. Vol. XXVIII, No. 5. P. 87–99. (in Russ.).
- Gorshkov V.G.** Physical and biological bases of life stability. Moscow: VINITI, 1995. 470 p. (in Russ.).
- Zheltukhin A.S., Kurbatova Yu.A., Sandler-sky R.B., Puzachenko M.Yu.** Stationary research in the Central Forest State Natural Biosphere Reserve // *Stud. in Geogr.* 2021. Coll. 152: Man and the Biosphere. P. 357–378. (in Russ.).
- Zamolodchikov D.G., Grabovsky V.I., Kraev G.N.** Dynamics of the carbon budget of forests in Russia over the last two decades // *Russ. J. Forest Sci.* 2011, No. 6. pp. 16–28. (in Russ.).
- Ivanova Yu.R., Skok N.V.** Seasonal development of plant communities in the context of changing weather conditions in the low mountains of the Middle Urals // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modelling*. 2019. Vol. XXX, No.1–2. P. 70–85. (in Russ.).
- Izrael Yu.A.** Ecology and control of the state of the natural environment / 2nd ed., suppl. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 560 p. (in Russ.).
- Izrael Yu.A., Philippova L.M., Insarov G.E., Semevsky F.N., Semenov S.M.** Environmental monitoring and regulation of the state of the natural environment // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modeling*. 1981. Vol. IV. P. 6–19. (in Russ.).
- Izrael Yu.A., Ryaboshapko A.G.** Climate geoengineering: implementation opportunities // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modelling*. 2011. Vol. XXIV. P. 11–22. (in Russ.).
- Izrael Yu.A., Semenov S.M., Khachaturov M.A.** Bioclimatological aspects of integrated global monitoring // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modelling*. Vol. XV. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. P. 8–20. (in Russ.).
- Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchinovich I.E.** Influence of climate change on natural zonality and ecosystems in Russia // *Climate change and their consequences*. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 205–210. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Results and prospects of geosystem monitoring in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve // *Bull. RAS. Ser. Geogr.* 2019, No. 3. P. 41–56. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Local mechanisms of global changes in natural ecosystems. Moscow: Nauka, 2008. 427 p. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Monitoring the sustainable development of forest ecosystems in a changing climate. Moscow: INFRA-M, 2024a. 547 p. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Search for mechanisms of global changes in the natural environment for the purpose of geosystem monitoring // *Bull. RAS. Ser. Geogr.* 2001, No. 1. P. 28–32. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Ways to implement a unified triad of regional monitoring in forest ecosystems at the current stage of global warming // *Advances in Current Biol.* 2024b. Vol.144, No. 1. P. 64–79. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Carbon balance and sustainability of forest ecosystems under global climate changes. Ecological resources of boreal forests. Moscow: Nauka, 2020. 423 p. (in Russ.).
- Kolomyts E.G.** Experimental geographic ecology. The notes of geographer-naturalist. Moscow: KMK, 2018. 716 p. (in Russ.).
- Kolomyts E.G., Kerzhentsev A.S., Sharaya L.S.** Analytical and cartographic models of functional stability of forest ecosystems // *Advances in Current Biol.* 2015. Vol. 135, No. 1. P. 127–149. (in Russ.).
- Kukhta A.E., Popova U.N.** Climatic signal in the linear growth of Scots pine in boreal phytocenoses of the White Sea coast // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modelling*. 2020. Vol. XXXII, No. 3–4. P. 33–42. (in Russ.).
- Forests of Russia and climate change. What can science tell us? / Leskenen P., Lindner M., Verkerk P. et al. (eds.). Bonn: European Forest Institute, 2020. 140 p. (in Russ.).
- Maksimova O.V., Minin A.A., Kukhta A.E.** On the connection between seasonal phenomena and processes in trees in the conditions of the Central Forest Biosphere Reserve // *Problems of ecol. monitoring and ecosystem modelling*. 2021. Vol. XXXII, No. 1–2. P. 56–66 (in Russ.).
- Milkov F.N.** Physical geography: current state, patterns, problems. Voronezh: VSU, 1981. 398 p. (in Russ.).
- Rankova E.Ya., Samokhina O.F., Antipina U.I., Smirnov V.D.** Features of the temperature regime at the surface of the globe in 2023 // *Fundamental and Applied Climatology*. 2024. Vol. 10, No. 2. P. 288–323. (in Russ.).
- Romanovskaya A.A.** Towards the concept of public administration and monitoring in the field of climate change in Russia // *Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling*. 2019. Vol. XXX, No. 3–4. P. 61–83. (in Russ.).
- Soloviev A.N., Shakhova T.G.** Phenological responses of the biota of the east of the Russian Plain to weather anomalies // *Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling*. 2011. Vol. XXXII, No. 1–2. P. 37–49. (in Russ.).
- Sochava V.B.** Geotopology as a section of the theory of geosystems // *Topological aspects of the study about geosystems*. Novosibirsk: Nauka, 1974. P.3–86 (in Russ.).
- Sukachev V.N.** Selected Works. Vol. 1. Basics of forest typology and biogeocoenology. Leningrad: Nauka, 1972. 418 p. (in Russ.).
- Timofeev-Resovsky N.V.** Structural levels of biological systems // *System research. Yearbook*. Moscow: Nauka, 1970. P. 80–113. (in Russ.).
- Utkin A. I.** Carbon cycle and forestry // *Russ. J. Forest Sci.* 1995, No. 5. P. 3–20. (in Russ.).
- Shvidenko A.Z., Schepashchenko D.G.** Carbon budget of Russian forests // *Siberian Forest J.* 2014, No. 1. P. 69–92. (in Russ.).
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Kraksner F., Onuchin A.A.** Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological prerequisites // *Siberian Forest J.* 2017, No.6. P. 3–25. (in Russ.).

**Beets P. N., Kimbereley M.O, Paul T.S.** et al. Plant-ed forest carbon monitoring system – forest carbon model validation study for *Pinusradiata* // N. Zeal. J. Forest Sci. 2011. Vol. 41. P. 177–189.

**Franklin J., Serra-Diaz J.M., Syphard A.D., Regan H.M.** Big data for forecasting global change impact on plant communities // Glob. Ecol. Biogeogr. 2017. Vol. 26, No. 1. P. 6–17.

**Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z. and Schepachenko D.G.** Boreal forest health and global change // Science. August 2015. Vol. 349, Iss. 6259. P. 819–821.

**Kljun N., Black T.A., Griffis T.J.** et al. Response of net ecosystem productivity of three boreal forest stands to drought // Ecosystems. 2007. Vol. 10. P. 1039–1055.

Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11 Dec., 2015. 19 p.

**Ontl T.A., Janowiak M.K., Swanston Ch.W.** et al. Forest Management for Carbon Sequestration and climate adaptation // J. of Forestry. 2020. Vol. 118, No 1. P. 86–101.

**Santoro M., Cartus O., Carvalhais N.** et al. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations // Earth System Sci. Data. 2021. Vol. 13, No. 8. P. 3927–3950.

**Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Soja A.J.** The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // Environ. Res. Lett. 2009. Vol. 4, Iss. 4. 045013. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045013.

## **GEOSYSTEM MONITORING OF FORESTS UNDER THE MODERN GLOBAL WARMING: LANDSCAPE-ECOLOGICAL APPROACH**

© 2025 **E.G. Kolomyts**

Institute of Fundamental Problems of Biology, Pushchino Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

*Abstract:* The article presents a strategy for studying the mechanisms of functional and structural organization of forest ecosystems as objects of terrestrial geosystem monitoring. Local mechanisms of global changes are understood through empirical imitation of a regional bioclimatic trend by local-level geosystems. The search strategy is presented in the form of an experimental geocological analysis, with the implementation of the complete monitoring triad "state–forecast–management". The main attention is paid to identifying climatogenic changes in three invariant functional parameters of forest biogeocoenoses: 1) the tightness of inter-component connections as an indicator of the territorial integrity of the geo(eco-)system; 2) discrete indicators of metabolism, and above all primary productivity, characterizing the efficiency of phytobiota use of environmental resources; 3) parameters of functional stability of geo(eco)systems (labile phytocoenotic and inertial soil-biotic) as integral indicators of their ecological reserve and adaptive potential in a changing climate. The article presents the ideological, scientific, and methodological aspects of a working concept for geosystem monitoring, as well as the methods developed by the author for basic and predictive empirical-statistical modeling of the functional and structural characteristics of forest ecosystems. Numerical experiments with hydrothermal niches of biogeocoenoses based on past and future climate trends are planned. A working algorithm for geosystem monitoring of forests is described, in which a sliding (pendulum) operating system serves as the analytical tool, with multiple repetitions of the observation and forecast stages (against the background of ongoing climate trends) and the identification of the ecological effects of control feedback, in particular, the role of the carbon balance of forest ecosystems in mitigating global warming. The scientific research strategy assumes a periodically reversible sequence of implementing the elements of the geosystem monitoring triad "observation–forecast–control", with the construction of empirical-statistical models of the transition of ecosystems "from the past to the future". Periodic monitoring (verification) of predicted forest ecosystem condition parameters (productivity, sustainability, carbon balance, etc.) is conducted using empirical data from landscape surveys for the current year, which will serve as a hydrothermal analogue for a specific interval of the predicted climate trend.

*Keywords:* global warming, forest ecosystems, geosystem monitoring, baseline and predictive empirical-statistical modeling