

УДК 9.929 + 57.557 + 50.502/504

DOI: 10.15372/GIPR20240301

Э.Г. КОЛОМЫЦ

Пушкинский научный центр биологических исследований РАН,  
Институт фундаментальных проблем биологии,  
142290, Пущино, ул. Институтская, 2, Россия, egk2000@mail.ru

## МОНИТОРИНГ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

*Изложена рабочая концепция геосистемного мониторинга лесных экосистем в условиях современного глобального потепления. Намечается проведение полного цикла мониторинга в его классической триаде Израэля–Герасимова: «наблюдение (оценка состояния) – контроль (прогноз) – управление (адаптация, обратная связь, регуляция)». Программа научного поиска содержит разработку эмпирико-статистических моделей состояния лесных экосистем в прошлом, настоящем и будущем с раскрытием механизмов прямых и обратных связей леса с климатом. Модели должны описать пространственное многообразие локального и регионального откликов лесного покрова на климатические сигналы, а также закономерности регуляции углеродного цикла лесными биогеосистемами. Согласно Парижскому Соглашению (2015) по изменению климата, намечается решение двуединой задачи «адсорбции–адаптации»: количественно оценить экологические ресурсы boreальных и nemоральных лесов в смягчении («митигации») современного потепления и рассчитать параметры устойчивости лесов к меняющемуся климату как меры их адаптивного потенциала. В плане решения этой задачи предложен рабочий алгоритм геосистемного мониторинга лесов, в котором описана последовательная смена стадий наблюдения, прогноза и регуляции, с выявлением эффектов митигации и адаптации по углеродным балансам лесных экосистем. Рабочим инструментом анализа служит скользящая (маятниковая) операционная система, где наблюдение и прогноз повторяются неоднократно, а базовые ландшафтно-экологические связи рассматриваются в качестве механизмов метаболической реакции лесных сообществ на изменения климата. Представленная программа описывает один из путей решения главной научно-практической задачи мониторинга — установления экологического потенциала лесных экосистем в данных зонально-региональных условиях для перехода к адаптивному лесному хозяйству.*

**Ключевые слова:** рабочая концепция геосистемного мониторинга, экологический эксперимент, углеродный баланс биогеосистем, экологический потенциал лесов, адаптивное лесное хозяйство.

E.G. KOLOMYS

Pushchino Scientific Center for Biological Research, Russian Academy of Sciences,  
Institute of Fundamental Problems of Biology,  
142290, Pushchino, ul. Institutskaya, 2, Russia, egk2000@mail.ru

## MONITORING OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF FOREST ECOSYSTEMS AT THE MODERN STAGE OF GLOBAL WARMING

*A working concept of geosystem monitoring of forest ecosystems under modern global warming is outlined. It is planned to carry out a full cycle of monitoring in its classical triad of Izrael–Gerasimov triad: “observation (state assessment) – control (forecast) – management (adaptation, feedback, regulation)”. The program of scientific research involves developing empirical and statistical models of the state of forest ecosystems in the past, present and future as well as uncovering the mechanisms of forest forward and backward linkages with climate. The models should describe the spatial diversity of the local and regional responses of forest cover to climatic signals as well as the regulation patterns of the carbon cycle by forest biogeosystems. According to the Paris Agreement (2015) on climate change, it is planned to solve the two-pronged problem of “adsorption–adaptation”: quantify the ecological resources of boreal and nemoral forests in mitigating modern warming and calculate sustainability parameters of forests to a changing climate as a measure of their adaptive potential. In terms of solving this problem, a working algorithm for geosystem monitoring of forests is proposed, which describes a successive change in the stages of observation, forecasting and regulation, with the identification of mitigation and adaptation effects on the carbon balances of forest ecosystems.*

*The working tool of analysis is represented by a sliding (pendulum) operating system where observation and forecasting are repeated many times, and the basic landscape-ecological relationships are regarded as mechanisms of the metabolic response of forest communities to climate change. The program presented describes one of the ways to solve the main scientific and practical task of monitoring, i. e. to establish the ecological potential of forest ecosystems in given zonal and regional conditions for the transition to adaptive forestry.*

**Keywords:** working concept of geosystem monitoring, ecological experiment, carbon balance of biogeosystems, ecological potential of forests, adaptive forestry.

## ВВЕДЕНИЕ

Большинство экологических проблем современности так или иначе связано с вопросами экологически устойчивого развития системы «природа—общество» (СПО). Понятие «устойчивое развитие» (УР) не имеет четкого определения, однако оно уже прошло путь осмысливания в многочисленных дискуссиях среди специалистов разного профиля и используется в научной литературе [1–3]. В нашем исследовании рассматривается первая часть СПО — «биосферацентрический» аспект УР, т. е. состояние природной среды, с анализом, однако, системообразующего влияния не только естественных, но и антропогенных факторов. Таким образом, речь будет идти об «экологически устойчивом развитии» в трактовке [2], и мы будем придерживаться данного определения.

«Согласно экологическому подходу, устойчивое развитие — это такое развитие, которое не выводит систему за пределы хозяйственной емкости биосферы. Оно не вызывает в биосфере процессов разрушения, деградации, результатом которых может стать возникновение принципиально неприемлемых для человека условий» [1, с. 43]. Основная движущая сила функционирования геосистем — это взаимоотношение биоты с неорганической средой: «...поступление субстанции в геосистему, отток ее вовне, а также превращение внутри системы» [4, с. 40]. Основные цели устойчивого развития биосферы состоят в обеспечении ее экологических функций, среди которых первостепенное значение имеет сохранение биоразнообразия и продуктивности растительного покрова.

«Природа изменяется как целое, как система блоков, на которые мы воздействуем» [5, с. 395]. Современная биосфера представляет собой высоко скоррелированную, саморегулирующуюся систему, которая обеспечивает устойчивость слагающих ее элементов, а при нарушении устойчивости 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.

## ЛЕСНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Экологическая безопасность континентальной биосферы существенно зависит от состояния зонально-региональных типов природных экосистем и, в первую очередь, лесного покрова [6], который играет на суще основную роль в сохранении водных ресурсов и в смягчении климатических колебаний [7, 8]. Особенно актуальной данная проблема становится в условиях начавшегося глобального потепления с его весьма разнообразными и подчас трудно предсказуемыми экологическими последствиями. «Лес справедливо рассматривается как одно из наиболее действенных средств смягчения неблагоприятных последствий изменения климата» [9, с. 17]. Лесной покров России составляет около 20 % площади всех лесов планеты, и более 90 % этой территории приходится на бореальные леса [8].

Современное глобальное потепление — свершившийся факт. Средний для территории России тренд повышения температуры за 1976–2020 гг. составил 0,51 °C за 10 лет, что более чем вдвое пре-восходило рост глобальной температуры [10]. При этом в два-три раза увеличилась частота опасных метеорологических явлений. В условиях таких темпов потепления прогнозируется повышение средней глобальной температуры к 2100 г. на 4 °C, а на территории России — до 6–11 °C [8]. Указанный климатический тренд должен вызвать в бореальном поясе снижение коэффициента атмосферного увлажнения с 1,29–1,37 до 0,78–0,75, т. е. до уровня увлажнения южной лесостепи [11].

Усиление повторяемости на этом фоне пиковых значений повышения температуры, при которых наступает критический предел функционирования лесных сообществ, особенно с преобладанием хвойных пород, может привести к необратимым изменениям и даже гибели лесов [7, 12]. Резко повысится частота негативных масштабных явлений, таких как засухи, ветровалы, пожары, вспышки увеличения численности энтомовредителей, усиление грибковых заболеваний и другие лесопатоло-

гические процессы [13]. Наибольшая уязвимость лесного хозяйства связана с лесными пожарами, площади которых в России увеличиваются [13]. Можно ожидать также вызванные засухами новые «волны» усыхания с ветровалами пихтово-еловых лесов Европейского Севера и дубрав Поволжья.

Как известно, «...мировое лесное хозяйство ищет выход в переходе к адаптивному лесному хозяйству ... Проблема адаптации лесов к климатическим изменениям относится к срочным сегодняшним проблемам лесного хозяйства России» [14, с. 52]. Адаптация экосистем к изменению климата — это их приспособляемость кенным изменениям, которая позволяет снизить уязвимость экосистем и полнее использовать благоприятные условия внешней среды. Адаптивное лесное хозяйство определяется как управляющая система, в которой проводятся целевые мероприятия, направленные на уменьшение уязвимости лесных экосистем или повышение их адаптационных способностей [15]. Таким образом, адаптивное лесное хозяйство нацелено на экологически ориентированное управление лесами [9].

Концепция национальной Программы приоритетных направлений развития лесной науки [13] в качестве первоочередных задач предусматривает развитие методов и технологий мониторинга в оценках ресурсного потенциала и экологического состояния лесов, их биоразнообразия и экосистемных функций, а также разработку моделей прогнозирования лесов в условиях комбинированного воздействия природных и антропогенных факторов, в том числе изменений климата.

Механизмы адаптации лесных экосистем к глобальным климатическим сигналам целесообразно рассматривать через призму их устойчивости к воздействию этих сигналов. Знание механизмов устойчивости лесных экосистем необходимо для прогнозирования их возможной деградации и потери ими экосистемных функций. Установлено, что при переходе порога устойчивости boreальных лесов к изменению климата их существенная трансформация может произойти уже в течение 50-летнего периода [7].

На основе дискретных параметров биологического круговорота разработаны количественные методы расчета и картографирования функциональной устойчивости лесных экосистем как целостных биохорологических единиц [11]. С помощью метрики евклидового расстояния проведены расчеты индексов мобильной (фитоценотической) и инерционной (почвенно-биотической) устойчивости двух типов: резистентной и упруго-пластичной. Это позволяет выявить метаболическое разнообразие указанных типов устойчивости как одной из важнейших характеристик в системе геоэкологического мониторинга.

Итак, стратегической целью мониторинговых исследований является раскрытие экологического потенциала перехода к адаптивному лесному хозяйству на основе изучения механизмов устойчивости лесных экосистем 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 лесообразующих пород. Мониторинг позволит создать научно-методические предпосылки для внедрения «...специальных режимов лесного хозяйства, направленных на формирование породного состава и структуры древостоя на регионально-типологической основе» [14, с. 57]. Тем самым предполагается внести определенный вклад в экологическое обоснование адаптивного устойчивого лесоуправления.

## ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОНЦЕПЦИИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

По определению Специальной комиссии Научного комитета по проблемам окружающей среды (СКОПЕ) Международного совета научных союзов [16], мониторинг включает «...наблюдения за факторами воздействия и состояния окружающей среды, прогноз ее будущего состояния и оценку фактически прогнозируемого состояния природной среды» [17, с. 11]. При этом «...проблема регулирования (и управления) качества природной среды опирается на экологическое прогнозирование и требует построения эколого-экономических моделей» [17, с. 16]. Всю систему контроля над окружающей средой кратко можно охарактеризовать следующей формулой: «наблюдение—контроль—управление» [18]. Реализация полной триады геоэкологического мониторинга призвана внести определенный вклад в выполнение одного из разделов Федеральной научно-технической Программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг. [19]. В данный раздел входит создание научноемких и технологических решений, направленных на раскрытие механизмов адаптации наземных экосистем к климатическим изменениям и их последствиям с помощью наблюдений и прогнозирования состояния климата и природной среды в целях обеспечения ее экологической безопасности.

Экологический мониторинг имеет два основных направления — биоэкологическое [17] и геоэкологическое, в том числе геосистемное [18]. Мы будем касаться геосистемного мониторинга, основное содержание которого составляют: комплексный анализ состояния гео(эко-)систем как целостных природных образований и как разнорядковых структурных единиц биосфера; оценка их устойчивости к внешним воздействиям; прогнозирование их антропогенных изменений.

Рациональная система геоэкологического мониторинга должна базироваться на уже имеющихся достижениях в практике изучения и регулирования состояния окружающей среды [20]. Отправной точкой научного поиска по климатическому мониторингу могут служить полученные автором теоретические и методические разработки локальных и региональных ландшафтно-экологических прогнозов [11]. Отметим основные результаты этих исследований.

Региональное прогнозное моделирование исходит из принципов актуализма и самоподобия прогнозно-климатической системы и основано на пространственных взаимосвязях гидротермических параметров. Эти связи используются, согласно закону эргодичности, для установления временной траектории состояний геосистем. Известно, что гидроэдафический фактор — определяющий в пространственной дифференциации геосистем малой размерности [4]. Через гидроэдафотопы осуществляется управляющее воздействие глобальной климатической системы, и по ним можно проследить движение и преобразование вещественно-энергетических и информационных сигналов по иерархической лестнице локальных и региональных геосистем. Обнаружены высокие корреляции летнего влагосодержания почвы с двумя параметрами глобальных и региональных климатических прогнозов: со средней температурой июля и годовым количеством осадков (соответственно, обратная и прямая экспоненциальные зависимости).

При прогнозных оценках на первые несколько десятков лет с точки зрения времен релаксации объектов первостепенное внимание должно быть уделено не структурным преобразованиям геосистем, а направленной смене их функционирования. Эти процессы занимают в таежной зоне первые несколько лет, а в подзоне широколиственных лесов завершаются в течение года. 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.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

В своей исходной рамочной концепции Ю.А. Израэль подчеркивал, что мониторинг в его полном объеме должен включать не только «слежение» (повторные наблюдения), но «...также оценку и прогноз состояния среды ... и регулирование качества среды» [17, с. 11, 12], т. е. реализацию всей его операционной триады. К сожалению, это важнейшее методологическое положение учения о геоэкологическом мониторинге выполняется крайне редко, особенно в региональных и локальных экологических исследованиях, хотя каждый раз упоминается сам термин «мониторинг». Как в отечественной, так 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 динамики почвенно-биотических компонентов с изменениями климата как основы для экологических прогнозов. По существу, идет бес предметное жонглирование термином «мониторинг», с выхолащиванием самого содержания этого сложного понятия.

Особняком от этих исследований стоят весьма содержательные работы второго этапа мониторинга — по региональному и планетарному эколого-географическому прогнозу, а также по прогнозированию углеродного баланса лесов [3, 8, 12, 15]. Третий же (заключительный) этап мониторинга — управление (регулирование) — находится еще в состоянии выдвигаемых определений, концептуальных гипотез и предлагаемых научно-методических программ. Здесь следует отметить предложенное понятие «геоинженерия климата» как целенаправленное изменение параметров климатической системы с целью предотвращения катастрофических экологических последствий глобального потепления [20]. Весьма конструктивной является выдвинутая концепция «мониторинга адаптации», которая расширяет существующую систему климатического мониторинга и представляет его заключительный этап в качестве «мониторинга климатической деятельности — смягчения климатических колебаний (митигации) и адаптации» [21].

В целом решение экологических задач по оценке роли лесов в смягчении глобального потепления не получило еще широкого распространения. Соответственно, единичными оказываются работы по

изучению потенциала этого смягчения средствами лесного хозяйства [8]. В обобщающей сводке Европейского института леса [22] лишь ставятся вопросы об устойчивом и климатически оптимизированном лесоуправлении и лесовосстановлении для смягчения последствий изменения климата и развития лесной биоэкономики замкнутого цикла. Редким исключением можно назвать предложенную стратегию управления лесами Национальных парков США [23].

Итак, каждая из трех частей триады климатогенного геэкологического мониторинга лесов к настоящему времени уже получила самостоятельное научно-методическое развитие, однако остается практически неосвещенной их интеграция в единую операционную систему локального и/или регионального мониторинга. Провозглашенная почти 50 лет назад рамочная концепция единой триады геэкологического мониторинга оказалась до сих пор не реализованной. По-прежнему стоит задача осуществления полного цикла 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 леса с климатом. Предпосылки такого экологического эксперимента локально-регионального порядка излагаются ниже.

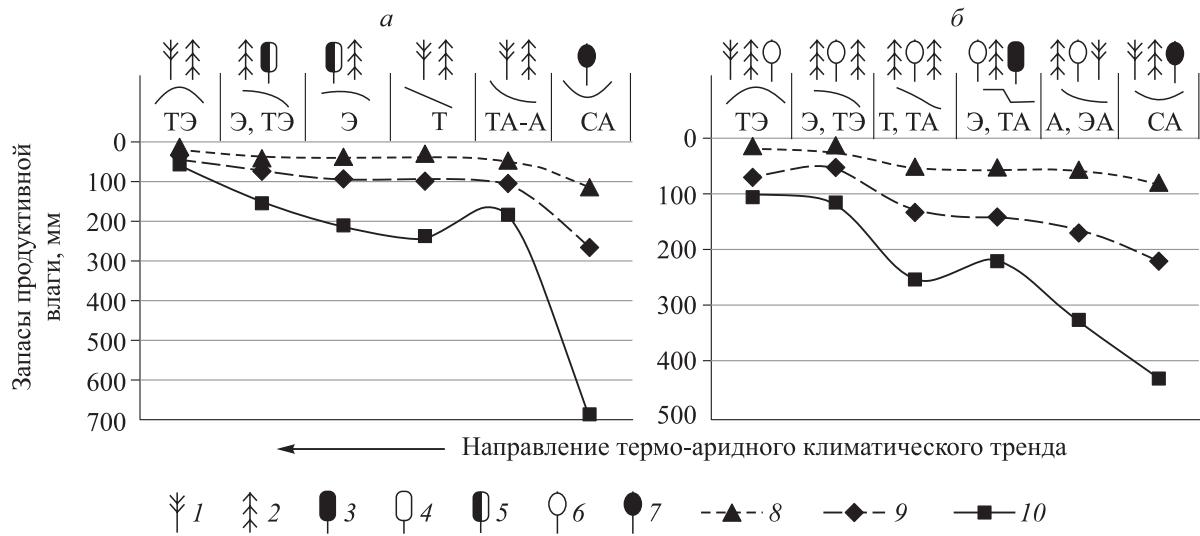
### РАБОЧИЙ АЛГОРИТМ ГЕОСИСТЕМНОГО МОНИТОРИНГА

Если для слежения за общими климатогенными изменениями состояния зонально-региональных типов природной среды широко используются методы дистанционного космического зондирования с применением геоинформационных технологий [8, 12, 24], то «...методология традиционных полевых наблюдений ... остается наилучшей для мониторинга постепенной трансформации фитоценозов, включая экзогенные сукцессии» [25, с. 11]. Будучи территориально достаточно ограниченными, наземные исследования дают несоизмеримо более разнообразный и глубокий по своему содержанию материал по сравнению с данными сканирующих радиометров и лазерных локаторов при спутниковом и лидарном дистанционном зондировании лесного покрова обширных территорий.

Опишем кратко предлагаемую стратегию исследовательской триады наземного геосистемного мониторинга — «наблюдение—прогноз—управление».

**Наблюдение (оценка состояния).** Истоки механизмов реакции разнорядковых ландшафтных структур на внешние возмущения лежат в организации геосистем локального (топологического) уровня и, прежде всего, ландшафтных фаций, или биогеоценозов. Сфера топов представляет собой наиболее комплексную и активную часть природной среды, ее функциональное «ядро» [4]. 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 [11], 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 экстраzonальных топогеосистем как представителей других зональных типов географической среды. Эти пространственно упорядоченные системы адекватны вектору прогнозируемых изменений климата (см. рисунок) и поэтому способны имитировать основные направления и масштабы экосистемных перестроек, создавая тем самым эмпирическую основу для прогнозных построений.

Оценка климатогенной смены состояний лесных биогеоценозов проводится сначала парциально по отдельным фитоценотическим и почвенным характеристикам. В дальнейшем возникает необходимость «...приведения изменений всех этих разнохарактерных величин к каким-либо одним единицам с целью получения обобщенной, суммарной оценки изменения состояния экосистем» [26, с. 12]. Критериями таких оценок могут служить «...отсутствие снижения продуктивности, стабильность и разнообразие системы» [17, с. 15]. На локальном уровне итоговый мониторинговый анализ мы предлагаем свести к выявлению изменений следующих трех инвариантных показателей структурно-функциональной организации биогеоценозов: 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 [17]; дискретных показателей метаболизма и, прежде всего, первичной продуктивности, характеризующих эффективность использования фитобиотой вещественно-энергетических ресурсов среды и



Распределение таксономических норм среднелиственных запасов продуктивной влаги в слоях почвы различных групп лесных биогеоценозов в системе их катенарной организации, адекватной термо-аридному климатическому тренду.

Экорегионы Среднего Поволжья [11]: северная граница широколиственноподзолистой подзоны на Приволжской возвышенности (полигон «Зеленый Город») (а); южная полоса подтаежной зоны в Низменном Заволжье (полигон «Керженец») (б). Локальные типы местоположений: Э — элювиальный (плакорный); ТЭ — трансэлювиальный; Т — транзитный; ТА — трансаккумулятивный; А — аккумулятивный; СА — супераккумулятивный; ЭА — элювиально-аккумулятивный. Лесообразующие древостои-доминанты: 1 — сосна; 2 — ель; 3 — дуб; 4 — липа, вяз; 5 — широколиственные без разделения; 6 — береза, осина; 7 — ольха черная. Напочвенный покров — лугово-степное разнотравье. Слои почвы: 8 — 0–20 см, 9 — 0–50 см, 10 — 0–100 см.

соответствующий уровень сбалансированности биологического круговорота [18]; параметров функциональной устойчивости геосистем [11]: лабильной (фитоценотической) и инерционной (почвенно-биотической) как интегральных показателей их экологического резерва, или ассимиляционной емкости [17], определяющих поведение фитобиоты и органического вещества почвы в меняющейся абиотической среде. Задача климатогенной трансформации перечисленных инвариантных функциональных показателей лесных биогеоценозов — описать картину соответствующего нарушения достигнутого ими ранее экологического равновесия.

Современное глобальное потепление должно вызывать в умеренных широтах общую аридизацию региональных биоклиматических систем с общим ухудшением лесорастительных условий в обширной зоне перехода от леса к степи. Это спровоцирует структурную перестройку лесных экосистем, направленную, прежде всего, на сохранение коэффициента полезного действия живой фитомассы и на переход к новому уровню сбалансированности производства и разложения органики. В экстремальном варианте подобная климатогенная сукцессия приводит к замене лесного сообщества сначала лесолуговым, а затем и степным [11].

Итак, первым шагом осуществления геосистемного мониторинга является вычленение экзогенных структурно-функциональных изменений ( $\Delta Q_{\text{экз}}$ ) 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 данный временной интервал возрастных сдвигов в параметрах состояния биогеоценозов ( $\Delta Q_{\text{возр}}$ ). Такие величины можно установить, используя материалы базовых (начальных) ландшафтно-экологических съемок. Возрастные изменения функционального состояния лесного сообщества включают в себя две основные составляющие: эндоэкологические и демутационные смены (сукцессии); динамику межвидовых и межпопуляционных взаимодействий в лесном биогеоценозе. Процедура вычленения структурно-функционального экзогенеза имеет следующий вид:

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

Здесь проводится операция алгебраического вычитания с учетом знака каждого члена правой части уравнения. Например, если полученная суммарная мера  $Q_{\text{сум}}$  связности моносистемной орга-

низации лесных биогеоценозов положительна, а возрастные изменения этой меры отрицательны, но с меньшими абсолютными значениями, то искомая величина  $\Delta Q_{\text{экз}}$  окажется положительной. В случае соотношения абсолютных значений ( $-\Delta Q_{\text{сум}}$ ) > ( $+\Delta Q_{\text{возд}}$ ) 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  $\Delta Q_{\text{сум}} < \Delta Q_{\text{возд}}$  (по модулю) мы всегда будем иметь отрицательные значения параметра  $\Delta Q_{\text{экз}}$ .

В качестве примера приведем результаты расчетов экзогенных (климатогенных) изменений общей годичной продукции (РС) лесных биогеоценозов Приокско-Террасного биосферного заповедника и его окружения за последний 24-летний период. Использованы материалы базовой ландшафтно-экологической съемки 1998 г. и повторной выборочной съемки, проведенной в 2022 г. по некоторому набору экосистем-аналогов из каждой биогеоценотической группы (табл. 1). Предварительно было установлено, что с возрастом насаждения достаточно тесно коррелирует его полнота (по массе древостоя), поэтому влияние полноты леса на его удельную продуктивность было учтено в неявном виде.

По данным соседней с заповедником ст. Кашира (средние линейные тренды), в течение рассматриваемого периода глобального потепления (1998–2022 гг.) средние температуры теплого и холодного периодов года увеличились, соответственно, на 0,8 и 1,5 °C, в то время как прирост годовых осадков был незначительным — около 30 мм. Это привело к уменьшению запасов продуктивной почвенной влаги в июле в среднем по территории заповедника с 67 до 52 мм. Налицо проявился термоаридный климатический тренд.

Таблица 1

**Расчет климатогенных изменений общей продуктивности лесных биогеоценозов  
в Приокско-Террасном государственном биосферном заповеднике и его окружении за период 1998–2022 гг.**

Группы биогеоценозов		Возраст лесного сообщества, годы	Общая продуктивность (РС), т/(га·год)		Климатогенные изменения продуктивности, $\Delta(\text{PC})_{\text{клим}}$
Описание	Символ		расчетная (по условиям 1998 г.), $\text{PC}_{\text{возд}}$	реальная (суммарная), $\text{PC}_{\text{сум}}$ , в 2022 г.	
Э и ТЭ сосняки, с березой, К и КМ, бруслично-вейниково-разнотравные и лишайниково-зеленомошные		51	11,65	11,98	+0,33
		122	11,11	10,00	-1,11
		111	14,23	11,16	-3,07
Э и ТЭ еловые и елово-сосновые леса, МГ, кислично-зеленомошные и кустарничково-разнотравные		90	7,50	9,84	+2,34
		119	13,09	11,11	-1,98
		121	12,40	11,31	-1,03
Э–ТА сосново-липово-дубовые и сосново-липовые леса, М и КМ, разнотравные и широкотравные		89	12,50	12,28	-0,22
		40	18,70	13,98	-4,72
		60	15,38	13,42	-1,96
		71	13,85	12,69	-1,16
		139	12,00	10,00	-2,00
		104	12,00	11,26	-0,74
ТЭ и Т липово-березовые леса, березняки и осинники с ливой, дубом и елью, М и МК, разнотравные		51	12,25	13,57	+1,32
		92	8,62	12,39	+4,13
		75	11,11	13,22	+2,11
		72	11,54	12,76	+1,03
		51	14,52	13,49	-1,03
		57	13,50	12,98	-0,74
Т и ТА еловые и елово-сосновые леса, МГ, черничные-кисличные и сфагново-зеленомошные		106	13,50	11,80	-0,70
		121	14,54	11,68	-2,86

Примечание. Э, ТЭ, Т, ТА — типы локальных местоположений (см. рисунок). Экологические группы биогеоценозов (степень увлажнения эдафотопа): К — ксероморфная; КМ — мезоксероморфная; КМ — ксеромезоморфная; М — мезоморфная; МГ — мезогидроморфная. Лесообразующие древостои-доминанты — см. рисунок.

В этих условиях выделенные нами группы лесных биогеоценозов заповедника достаточно четко дифференцировались по климатогенным изменениям общей продуктивности (см. табл. 1). Наибольшее снижение общей продуктивности произошло в мезогидроморфных сосново-еловых лесах подножий склонов и речных долин (группа биогеоценозов 5). Несколько меньшую отрицательную величину  $\Delta PC_{\text{клим}}$  проявили ксероморфные сосняки и ксеромезоморфные сосново-широколиственные леса водоразделов и прилегающих к ним склонов (группы 1 и 3). Минимальное же снижение  $PC_{\text{сум}}$  было свойственно плакорным сосново-еловым лесам и чистым ельникам (группа 2). В то же время березняки и осинники отличались почти повсеместным в различной степени увеличением общей годичной продукции. Очевидно, глобальное потепление на данном отрезке своего тренда благоприятно сказалось на функционировании только вторичных лесных сообществ и негативно отразилось на состоянии коренных ассоциаций, как бореальных, так и суббореальных.

**Прогноз (контроль).** Экологические прогнозы в большинстве случаев касаются глобального уровня биосферы и крупных экорегионов. В частности, дана картина общих закономерностей глобально-го круговорота углерода и парникового эффекта атмосферы в голоцене и в современный период в связи с изменениями температуры [3]. Глобальные прогнозные оценки роли лесного покрова в регуляции парникового эффекта атмосферы представлены в мелкомасштабных сценариях углеродного бюджета циркумполярных бореальных лесов Евразии и Северной Америки на основе корреляционных связей их биомов с ареалами температуры и осадков [12]. Ожидаемые воздействия изменений климата на леса России и механизмы адаптации лесов рассматриваются для использования последних в качестве средств смягчения климатических сигналов. Это входит в разрабатываемую в работе [8] концепцию перехода к устойчивому управлению лесами России.

Поведение региональных и локальных лесных образований в условиях меняющегося климата остается гораздо менее изученным. В данном аспекте автором разработана методика численного ландшафтно-экологического прогнозирования [11]. Основной принцип 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.

Сам ландшафтно-экологический прогноз представляет собой систему операций с экологическими (гидротермическими) нишами изучаемых объектов. 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 глобального климатического прогноза на различные сроки.

Прогноз осуществляется по материалам многолетней серии повторных ландшафтно-экологических съемок на изучаемой территории (см. выше). Исходная (базовая) съемка включает полный набор структурно-функциональных характеристик лесных биогеоценозов [11]. На площадках стационарных наблюдений 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 колебаниях. 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.

Прогнозные расчеты изменений каждого функционального параметра лесных экосистем проводятся по следующей схеме. Для каждого прогнозного срока общее значение изменений данного функционального параметра ( $\Delta Q_{\text{сум}}$ ) складывается из его будущих 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.

Прогнозируемые сценарии парциальных и комплексных функциональных параметров лесных биогеоценозов могут быть верифицированы эмпирическим материалом. В табл. 2 приведен пример верификации такого прогноза по общей продуктивности для некоторых лесных сообществ в Приокско-Террасном биосферном заповеднике на период 1998–2022 гг. Прогноз осуществлялся по умеренной климатической модели GISS и экстремальной модели HadCM3, версия A2 [11]. Напомним, что первая модель дает прогноз, отвечающий задачам, поставленным Парижским Соглашением по изменению климата [27], а вторая описывает будущий сценарий, адекватный современному беспрецедентному росту глобального потепления. Ожидаемый по обеим моделям климатогенный рост продуктивности был подтвержден только для вторичных мелколиственных лесов (чистых и с примесью широколиственных пород) практически всех типов местоположений, а также для сосняков и ельников подножий склонов. В то же время прогнозируемые положительные значения  $\Delta(PC)_{\text{клим}}$  для хвойно- и смешаннолесных сообществ верхнего и среднего звеньев катен не подтвердились фактическими данными.

**Управление (обратная связь).** Как уже говорилось, на основе геоэкологических прогнозов решается проблема регулирования качества природной среды, т. е. определенного управления ею, с установлением эффектов допустимых воздействий, а также вероятностей риска тех или иных экологических последствий. Одним из эффективных направлений данного — заключительного — этапа геосистемного мониторинга может служить представленная в работе [11] концепция углеродных балансов и функциональной устойчивости лесных экосистем при глобальных изменениях климата. В этой концепции описана поглощающая и адаптивная способность лесных, главным образом boreальных, биомов Европейской России в условиях современного антропогенного потепления. Адаптацию и «митигацию» (mitigation) можно отнести уже к мониторингу климатической деятельности, согласно [21]. Научный поиск велся нами в соответствии с Парижским Соглашением по изменению климата [27]. Приведем основные научно-методические результаты проведенного исследования, которые могут быть примером реализации данного этапа геосистемного мониторинга.

Таблица 2

**Верификация прогнозных расчетов климатогенных изменений общей продуктивности ( $PC$ , т/(га·год)) лесных биогеоценозов в Приокско-Террасном государственном биосферном заповеднике и его окружении за период 1998–2022 гг.**

Группы биогеоценозов, (см. табл. 1)	Базовая продуктивность (в 1998 г.)	Прогнозируемая продуктивность в 2022 г.		Реальная продуктивность в 2022 г.	Климатогенные изменения продуктивности $\Delta(PC)_{\text{клим}}$ в 2022 г.		
		по модели GISS	по модели HadCM3		расчетные по модели GISS	расчетные по модели HadCM3	реальные
1	13,01 (8)	14,21 (8)	15,33 (8)	11,05 (3)	+1,20 (8)	+2,32 (8)	-1,82 (3)
2	13,10 (7)	14,41 (7)	15,58 (7)	10,61 (3)	+1,31 (7)	+2,48 (7)	-0,67 (3)
3	13,62 (7)	14,60 (7)	15,50 (7)	12,20 (6)	+0,98 (7)	+1,88 (7)	-1,80 (6)
4	13,44 (9)	14,60 (9)	15,62 (9)	12,97 (6)	+1,16 (9)	+2,18 (9)	+1,17 (6)
5	10,78 (7)	13,20 (7)	15,37 (7)	14,02 (2)	+2,42 (7)	+4,59 (7)	+2,28 (2)

**Примечание.** В реальной продуктивности все данные осреднены по группам биогеоценозов. В скобках указано число пробных площадей.

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 [2, 3]. 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 флюктуаций.

Разработаны алгоритмы расчетов углеродного баланса boreальных и неморальных лесных биогеосистем, а также объемов поглощения ими парниковых газов при прогнозируемых глобальных изменениях климата [11]. 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 пульах 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 Соглашением [27]. Установлен адсорбционный потенциал коренных и производных boreальных 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.

Решение задач устойчивого управления лесами «...есть переход к адаптивному лесному хозяйству» [9, с. 16]. Речь идет о создании таких адаптированных лесных сообществ, которые осуществляют оптимальное регулирование углеродного цикла и тем самым обеспечивают свою устойчивость в меняющемся климате. Именно так можно сформулировать задачу раскрытия экологического потенциала лесов как необходимого условия перехода к адаптивному лесному хозяйству. Данная концепция [8, 9] предполагает управление и использование лесов таким образом, чтобы поддерживать их биоразнообразие, устойчивость и продуктивность, а также их способность выполнять экологические функции, в том числе по смягчению современного глобального потепления. Эти четыре показателя рассматриваются на заключительном этапе геоэкологического мониторинга. Система последовательных действий устойчивого управления лесами должна включать: анализ обратной связи растительности с климатом; расчеты и описание региональных индикаторов функциональной устойчивости лесов; создание новой единой системы лесоустройства и оперативного мониторинга на зонально-типологической основе.

Согласно Программе управления лесами Национального парка Сплит-Рок-Лайтхаус в штате Висконсин (США) [23], можно ориентироваться также на решение следующих задач по обеспечению адаптивного лесного хозяйства: сохранение или увеличение площади лесных земель и восстановление лесов после нарушений; поддержание фундаментальных экологических функций леса путем содействия его видового и структурного разнообразия; определение участков с наиболее высокой углеродной ценностью в ландшафте; изменение видового состава и структуры леса для максимального увеличения запасов углерода.

## 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 выявление 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.

Концепция мониторинга устойчивого развития природных экосистем в условиях современного глобального потепления уже по своему определению не может ограничиваться результатами традиционных многолетних режимных наблюдений. Последние составляют лишь первый этап мониторинга — оценку прошлого и текущего состояния изучаемых объектов. Перспективы устойчивого развития лесов в меняющемся климате могут быть выявлены лишь при верифицированном прогнозировании их поведения по тому или иному гидротермическому тренду (второй этап мониторинга), с установлением механизмов их адаптации к новым условиям и обратного воздействия на климат путем положительной регуляции углеродного цикла (митигации), обеспечивающей их устойчивое развитие (третий этап мониторинга). Само сочетание понятий «мониторинг» и «устойчивое развитие» как инструментов исследовательского процесса представляет собой определенную операционную систему, призванную подойти к решению актуальной практической задачи — к раскрытию экологического потенциала лесов для организации адаптивного лесного хозяйства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. — М.: Прогресс — Традиция, 2000. — 416 с.
2. Лосев К.С. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. — М.: Изд-во «Космосинформ», 2001. — 399 с.
3. Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Естественно-научные основы устойчивости жизни. — М.: Изд-во Всерос. ин-та науч. и технич. инф. РАН; Изд-во Ин-та географии РАН, 2003. — 239 с.
4. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 319 с.
5. Сочава В.Б. Проблемы прикладной географии в связи с созданием Байкало-Амурской магистрали // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. — 1975. — Т. 70, вып. 5. — С. 385–396.
6. Сукачев В.Н. Избранные труды. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. — Л.: Наука, 1972. — 418 с.
7. Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J. Tipping element in the Earth Climate System // Proceeding of the National Academy of Sciences. — 2008. — Vol. 105, N 6. — P. 1786–1793.
8. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Кракснер Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. — 2017. — № 6. — С. 3–25.
9. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. — 2014. — № 1. — С. 69–92.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М.: Росгидромет, 2021. — 104 с.
11. Коломыш Э.Г. Экспериментальная географическая экология. — М.: Наука, 2018. — 716 с.
12. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T. et al. Boreal forest health and global change // Science. — 2015. — Vol. 349, Iss. 6250. — P. 819–822.
13. Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М. и др. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами // Лесоведение. — 2015. — № 4. — С. 243–254.
14. Швиденко А.З. Глобальные изменения и российская лесная таксация // Лесная таксация и лесоустройство. — 2012. — Т. 47, № 1. — С. 52–75.
15. Borrini-Feyerabend G., Farvar M.T., Nguiggiiri J.C., Ndangang V.A. Co-management of natural resources organization, negotiating and learning-by-doing. — Heidelberg, Germany, GTZ and IUCN: Kasperk Verlag, 2000. — 245 p.
16. Mann R.E. Global environmental monitoring system [Text]/ R/E/ Mann // SCOPE. — 1973. — Rep. 3. — 130 p.
17. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 560 с.
18. Герасимов И.П. Экологические проблемы в прошлой, настоящей и будущей географии Мира. — М.: Наука, 1985. — 247 с.
19. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 февраля 2022 г. № 133 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы» [Электронный ресурс]. — <http://static.-government.ru/media/files/Ekv7TcPAJBv4n3oUn6ofUdAR5cu5W1PM.pdf> (дата обращения 20.05.2023).
20. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г. Геоинженерия климата: возможности реализации // Проблемы экологич. мониторинга и моделирования экосистем. — 2011. — Т. 24. — С. 11–22.
21. Романовская А.А. Потребности и пути развития мониторинга адаптации // Проблемы экологич. мониторинга и моделирования экосистем. — 2018. — Т. 29, № 1. — С. 107–125.
22. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.-J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B. Russian forests and climate change // What Science Can Tell Us. — 2020. — N 11. — 138 p.
23. Ontl T., Janowiak M., Swanston C., Daley J., Handler S., Cornett M., Hagenbuch S., Handrick C., McCarthy L., Patch N. Forest Management for carbon sequestration and climate adaptation // Journ. of Forestry. — 2020. — Vol. 118, N 1. — P. 86–101.

24. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. — М.: Институт космических исследований РАН, 2016. — 208 с.
25. Израэль Ю.А., Семёнов С.М., Хачатуров М.А. Биоклиматологические аспекты комплексного глобального мониторинга // Проблемы экологич. мониторинга и моделирования экосистем. — 1993. — Т. 15. — С. 8–20.
26. Израэль Ю.А., Филиппова Л.М., Инсаров Г.Э., Семевский Ф.Н., Семенов С.М. Экологический мониторинг и регулирование состояния природной среды // Проблемы экологич. мониторинга и моделирования экосистем. — 1981. — Т. 4. — С. 6–19.
27. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015 [Электронный ресурс]. — <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf> (дата обращения 22.05.2023).

*Поступила в редакцию 29.05.2023*

*После доработки 10.10.2023*

*Принята к публикации 07.05.2024*

---