

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии.
2022. – Т. 31. – № 2. – С. 5-17.

УДК 574+91.911.913.929

DOI 10.24412/2073-1035-2022-10441

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ГЕОСИСТЕМНОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ ПО ТРЕНДУ СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2022 Э.Г. Коломыц

Поступила 25.10.2021

Пушинский научный центр РАН, Институт фундаментальных
проблем биологии, г. Пущино (Россия)

Аннотация. Ландшафтно-экологический подход к геосистемному мониторингу лесного покрова основан на разработанной ранее автором геоэкологической концепции «Глобальные изменения на локальном уровне». Предложенная стратегия изложена в форме экспериментального геоэкологического анализа, с реализацией полной триады экологического мониторинга лесных экосистем «наблюдение – прогноз – управление». Охарактеризованы научно-методические основы концепции геосистемного мониторинга. Отмечены преимущества и недостатки дискретного эмпирико-статистического прогнозного моделирования гео(эко-)систем. Описаны рекомендуемые базовые и прогнозные модели, базирующиеся на материалах крупномасштабных ландшафтных съемок. Установлено, что замыкающими звеньями в системе геофизических связей являются гидроадафические признаки, которые оказывают прямое влияние на распределение фитоценологических и почвенных объектов и служат основным звеном передачи климатических сигналов с глобального и регионального уровней на локальный. В качестве одного из руководящих инструментов мониторинга может выступать региональная система локальной зональности природных комплексов, которая способна имитировать их реакцию на глобальные изменения климата. В адаптивном аспекте мониторинга, охватывающем наблюдение и прогноз, рекомендуется использовать меру функциональной упруго-пластичной устойчивости лесных экосистем, которая характеризует их сукцессионно-восстановительный потенциал. По заключительному этапу «управление (обратная связь)» приводится пример прогнозных оценок экологических ресурсов лесного покрова Волжского бассейна как его способности дополнительно поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата, что имеет прямое отношение к смягчению современного глобального потепления.

Ключевые слова: лесные экосистемы, глобальные изменения климата, геосистемный мониторинг, ландшафтно-экологический эксперимент, базовое и прогнозное эмпирико-статистическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность крупных территориальных подразделений континен-

тальной биосферы существенно зависит от состояния зонально-региональных типов природных экосистем, и в первую очередь, лесного покрова (Сукачев, 1972; Герасимов, 1985; и др.). Растительный компонент природных ландшафтов осуществляет биологи-

Коломыц Эрланд Георгиевич, ведущий науч. сотр., докт. геогр. наук, проф., egk2000@mail.ru

ческую регуляцию газового состава атмосферы, глобального влагооборота, водно-теплового режима почв, процессов выветривания, накопления в почве необходимого для жизни биогенных химических элементов. В этой глобальной и жизненно необходимой для человека функции растительности экологическая роль лесного покрова особенно велика, поэтому проблема сохранения лесных экосистем и воспроизводства лесных ресурсов на южной границе лесной зоны умеренных широт, где лесные сообщества находятся в состояниях, близких к критическим, относится к числу фундаментальных экологических проблем. Она всегда была актуальной для Европейской России, в пределах которой обширная переходная полоса от леса к степи, т.е. зональный лесостепной экотон, составляет индустриальное и демографическое ядро нашей страны. Поэтому в отечественной географии эта проблема имеет глубокие исторические корни (С.И. Коржинский, В.В. Докучаев, Г.И. Танфильев, Г.Ф. Морозов, Г.Э. Гроссет, Л.С. Берг, А.А. Григорьев, Ф.Н. Мильков, М.И. Будыко и др.). В настоящее время в ее решении все большее значение приобретают вопросы устойчивости природных экосистем как естественноисторической основы устойчивого развития региона.

Среди основных разделов лесной экологии следует назвать, во-первых, оценку состояния качества фитоценологической среды, характеризуемого геофизическими, геохимическими и биотическими параметрами, а во-вторых, – установление экологического резерва лесных сообществ и предельно допустимых антропогенных нагрузок в целях разработки принципов экологического нормирования с учетом экономических и социальных аспектов. Перечисленные вопросы входят в перечень задач биоэкологического (Израэль, 1984), а также геоэкологического и в том числе геосистемного (Герасимов, 1975, 1978) мониторинга.

Основное содержание геосистемного мониторинга составляют комплексный анализ состояния гео(эко-)систем как целостных природных образований и как разнопорядковых структурных единиц биосферы, оценка их устойчивости к внешним воздействиям, а также прогнозирование их антропогенных изменений (Герасимов, 1975). Всю систему контроля над окружающей средой (Израэль, 1984) кратко можно охарактеризовать следующей тирадой: «наблюдение

(оценка состояния) – контроль (прогноз) – управление (обратная связь)». Первые две составляющие триады предложено объединить в *мониторинг адаптации*, с разработкой мероприятий по обеспечению устойчивости экосистем в меняющемся климате (Романовская, 2018).

Целенаправленное регулирование (управление) природными экосистемами осуществляется на завершающем этапе мониторинга. «Необходимой предпосылкой рационального управления окружающей средой является заблаговременный и достоверный прогноз, т.е. предупреждение и предсказание возможных изменений в ней с вытекающими из них необходимыми мероприятиями. <...> Эффективный контроль и достоверный прогноз разнообразных изменений в окружающей среде рассматриваются в настоящее время как все более актуальная задача мониторинга» (Герасимов, 1978, с. 15).

В традиционном геоэкологическом мониторинге обычно рассматриваются экологические последствия преимущественно очаговых антропогенных воздействий на природную среду: агро- и лесопромышленного, индустриального, транспортного. Особенно широко известны исследования по биоиндикации техногенного загрязнения природных сред. В последние десятилетия существенное развитие получили исследования возможных функциональных и структурных преобразований природных экосистем под влиянием антропогенных изменений климата, в том числе современного глобального потепления. В настоящем сообщении предложены некоторые ландшафтно-экологические подходы к разработке *климатогенного геоэкологического мониторинга лесов*. Эти подходы основаны на многолетнем опыте автора по изучению и прогнозированию климатогенной динамики лесного покрова Волжского бассейна (Коломыц, 2005, 2008, 2018, 2020).

ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ ГЕОСИСТЕМНОГО МОНИТОРИНГА

Истоки механизмов реакции разнопорядковых ландшафтных структур на внешние возмущения лежат в организации гео(эко-)систем локального уровня и, прежде всего, ландшафтных фаций, или биогеоценозов (Сукачев, 1972). Биогеоценоз рассматривается как элементарная хронологиче-

ская единица биологического круговорота, представляющая собой весьма сложную саморегулируемую систему с микроэволюционными процессами (Тимофеев-Ресовский, 1970). Абсолютное доминирование в ней вертикальных (межкомпонентных) связей предопределяет высокую степень скоррелированности составляющих ее геокомпонентов и достаточно жесткую замкнутость биогенного цикла вещественно-энергетического обмена (Кондратьев и др., 2003).

Сфера топов представляет собой наиболее комплексную и активную часть природной среды, ее функциональное «ядро» (Сочава, 1974). Не случайно в качестве первостепенных задач геосистемного мониторинга И.П. Герасимов (1985) считал изучение внутреннего оборота веществ в главных природных экосистемах и оценку сбалансированности биологического круговорота как необходимого условия их устойчивости. Гео(эко-)системы локального уровня характеризуют в каждом регионе не только зонально-региональный фон территории, но и типичное разнообразие местных отклонений от него, которые способны имитировать фоновые характеристики других регионов, нередко весьма отдаленных. Многообразие локальных природно-территориальных структур должно соответствовать и множество их ответных реакций на глобальные изменения, что позволяет существенно раздвинуть рамки данной модельной территории и выйти на обобщения зонально-регионального масштаба.

В свете изложенного очевидно, что *локальный мониторинг глобальных изменений* природной среды представляет собой стратегически наиболее фундаментальный, хотя и достаточно трудоемкий, путь научно-методического обеспечения оценок экологических последствий техногенных воздействий на климат в масштабе экономических и административных регионов. Ключевыми (опорными) пунктами мировой системы геоэкологического мониторинга должны стать территории биосферных заповедников, с изучением и прогнозированием репрезентативных параметров автономных, транзитных и аккумулятивных природных комплексов (Герасимов, 1975).

В создании научно-методической основы геосистемного мониторинга целесообразно использовать прогнозную ландшафтно-экологическую концепцию «Глобальные изменения на локальном уровне (Коломыц,

2008, 2018). Она содержит в себе обоснование путей и методов установления тех параметров структурно-функциональной организации лесных экосистем топологического уровня, которые наиболее чувствительны к глобальным и региональным климатическим сигналам, и которые, следовательно, могут быть использованы для разработки локальных и региональных биогеографических прогнозов в свете предстоящих изменений климата.

Речь идет об установлении механизмов реакции лесных сообществ умеренного пояса, особенно находящихся у южных границ своего распространения, на неблагоприятные для них воздействия климатической системы. Такие механизмы познаются наиболее глубоко на локальном уровне экосистемной иерархии, что подтверждено опытом многолетних режимных биогеоэкологических исследований на комплексных стационарах, в том числе в заповедниках и природных национальных парках, как в России, так и за рубежом. Однако подобные работы весьма трудоемки и длительны, поэтому, они обычно ограничиваются изучением выборочных таксонов во времени – динамики, метаморфозы и эволюции незначительного числа «эталонных» экосистем. Вне поля зрения остаются таксоны в пространстве – сами функциональные географические поля, обусловленные гео- и биоразнообразием местных природной условий. Между тем именно пестрота (топография) этих полей, создающая определенный спектр локальных реакций на одно и то же фоновое воздействие, обеспечивает устойчивость зонально-региональных типов биогеосистем путем изменчивости и взаимной трансформации слагающих их систем локального уровня.

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ БАЗОВОГО И ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Известные методы дистанционного мониторинга основаны на сравнительном анализе аэрокосмических материалов, которые интегрально описывают «... особенности отражаемого поверхностью излучения как комплексной функции типа земной поверхности, ее структурных и физико-химических характеристик» (Барталев и др., 2012), с. 263). Данные спутниковых сенсоров не содержат непосредственно сведений о параметрах метаболизма, поэтому по ним за-

труднительно выявить необходимое разнообразие функциональных связей между биотой и средой. Соответственно проблематичной в рамках дистанционного мониторинга остается задача управления функциями природных экосистем в условиях изменчивой абиотической среды, что имеет прямое отношение к современному глобальному потеплению.

Ландшафтно-экологический подход ставит своей целью разработку научно-методических основ *наземного пространственного функционального мониторинга лесов* на основе эмпирически устанавливаемых локальных и региональных ландшафтно-экологических связей, которые рассматриваются в качестве механизмов метаболической реакции лесных экосистем на изменение климата. В таком научно-методическом аспекте проблема мониторинга остается еще слабо разработанной. На примере крупного региона Восточной Европы – Волжского бассейна был впервые создан *рабочий вариант локальной прогнозной концепции* для зональных типов лесных экосистем, которые, будучи элементами *бореального экотона* Русской равнины, находятся в современных климатических нишах, близких к критическим и потому являются весьма благоприятным объектом мониторинговых исследований (Коломыц, 2005). Данная концепция вписывается в общее направление работ по «Международной геосферно-биосферной программе» (МГБП) в рамках темы «Экотоны в изменяющейся окружающей среде» (Котляков, 1992).

Опыты региональных и локальных экологических прогнозов, в отличие от прогнозов глобальных, носят еще в значительной мере пионерный характер и поэтому в них трудно выявить черты самостоятельного научного направления, со своим теоретическим и научно-методическим арсеналом. Особенно слабо разработаны численные (теоретические) методы ландшафтно-экологического прогнозирования. Широко используемые отечественными и зарубежными исследователями *имитационные (континуальные, они же динамические) модели* (Соколов, Базилевич, 1983; Schimal et al., 2002; Заварзин, 2007; и др.) по существу не выходят за пределы аут- и синэкологии, оставляя вне поля зрения экологию географическую (пространственную). Это модели с сосредоточенными параметрами; они не дают территориальной развертки регио-

нального и локального отклика на внешние фоновые возмущения. Характеризуя достаточно подробно прогнозные сценарии по отдельным геокомпонентам, имитационные модели не могут дать целостного представления о будущем облике самой экосистемы, о степени ее устойчивости при новых сочетаниях средообразующих и функциональных параметров (Тишков, 1988). Успехи имитационного моделирования объясняются тем, что оно рассматривает слишком простые экологические связи (Виноградов, 1998), либо идет по линии выбора достаточно однородных областей земной поверхности с тем, чтобы получить обобщенные прогнозные характеристики (Пегов и др., 1986).

Гео(эко-)системы как многокомпонентные целостные образования с «плохой» структурой наиболее адекватно могут быть описаны с помощью *методов дискретной математики*. Следуя разработкам (Крапивин и др., 1982), мы рассматриваем биосферу как *статистический ансамбль биогеоценозов* – слабо взаимодействующих между собой, но внутренне высоко скоррелированных элементарных биохорологических единиц (см. выше). Отсюда – правомерность использования статистических методов (теории информации, теории множеств, кластерного анализа, геоморфометрии и др.) при описании биогеоценотического покрова, с приданием ему определенных функциональных свойств, связанных со структурой вещественно-энергетических потоков. На основе этих методов нами разработана серия базовых и прогнозных *эмпирико-статистических моделей*, по определению (Розенберг, 1984). Эти модели (Коломыц, 2008) позволяют формализованно описывать три фундаментальные географические закономерности, согласно (Сочава, 1978): интеграцию геокомпонентов в природные комплексы данного таксономического ранга, дифференциацию последних в пределах данного геопространства и, наконец, их иерархическую организацию.

Выгодно отличаясь от имитационных моделей способностью более полно описывать свойства географического пространства, модели эмпирико-статистические имеют свои существенные недостатки, которые особенно ощутимы в прогнозно-экологическом анализе. Главным является их «неопределенность во времени» (Lischke et al., 1998). По этим моделям можно пред-

сказывать только *потенциальные будущие состояния экосистем*, время достижения которого остается неопределенным. Дискретные эмпирико-статистических моделей природных экосистем относятся к классу *статичных моделей*. Однако они позволяют давать быструю оценку состояний экосистем и их изменений на больших площадях (Lischke et al., 1998). В частности в них могут быть адекватно отражены процессы стабилизирующего отбора как реакция биоты на климатические возмущения, превышающие порог ее адаптации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Если для слежения за общими климато-генными изменениями состояния зонально-региональных типов природной среды широко используются методы дистанционного космического зондирования, с применением геоинформационных технологий (Исаев, 1986; Барталев, Исаев, 2004), то «методология традиционных полевых наблюдений <...> остается наилучшей для мониторинга постепенной трансформации фитоценозов, включая экзогенные сукцессии» (Израэль и др., 1993, с. 11). Система наземного геоэкологического мониторинга содержит определенный набор *экспериментальных базовых и прогнозных исследований* функциональных характеристик природных экосистем и их антропогенных трансформаций, вызывающих нарушение природного экологического равновесия (Герасимов, 1975). В экологическом эксперименте выявляются *«необратимые явления и процессы, превышающие пределы естественной «устойчивости» и «воспроизводства», приводящие к разрушению экосистемы»* (там же, с. 12). Тем самым решается задача установления «оптимальных условий для развития, существования и естественного воспроизводства природных экосистем и их биоты» (там же, с. 14).

В физической географии, в том числе в ландшафтоведении, проведение географического эксперимента связывается обычно с изучением на комплексных стационарах различных природных режимов (геофизических, геохимических, биогеоценотических и др.) для весьма ограниченного набора биогеоценозов (Герасимов, Грин, 1976; Крауклис, 1979). Такие исследования можно отнести к категории управляемых (манипулятивных) экспериментов, необходимыми

составляющими которых являются *повторность воздействия и контроль*; последний отслеживает дрейф во времени и регулирует условия, в которых проводится эксперимент (Хелберт, 2008а). Однако осуществление многолетних режимных наблюдений за геотоками даже в небольшом числе локальных геосистем на нескольких стационарных полигонах одновременно – весьма сложная задача. Известная полимасштабность ландшафтной организации (Хорошев, 2016) предполагает, чтобы натурная стационарная модель представляла собой систему вложенных друг в друга пунктов режимных наблюдений, ключевых участков, трансект и окружения самого стационара (Крауклис, 1979), что весьма усложняет организацию стационарных экспериментальных исследований.

Задача оказывается гораздо более сложной, когда объектом исследования становятся не отдельные элементарные биогеоценотические единицы, а разномасштабная система топологических и тем более региональных природных комплексов. «Зачастую эти крупномасштабные управляемые эксперименты лишены повторности воздействия», однако можно «максимизировать ценность эксперимента, контролируя в нем возможно большее количество различных переменных» (Хелберт, 2008b, с. 64–65). Именно в таком направлении должен осуществляться, по-видимому, массовый ландшафтно-экологический эксперимент.

Началом экспериментальных работ служит проведение *однократной крупномасштабной ландшафтно-экологической съемки*, которая позволяет в достаточно короткие сроки полевых работ получить массовую экспресс-информацию о максимально возможном разнообразии состояний топогео(эко-)систем в данном регионе. На материалах именно таких съемок проведены нами базовые и прогнозные ландшафтно-экологические эксперименты (Коломыц, 2018, 2020).

ПРЕДПОСЫЛКИ НАУЧНОГО ПОИСКА

Отметим некоторые положения таких предпосылок, в рамках которых может осуществляться сама процедура геосистемного мониторинга.

1. Региональное и локальное прогнозное моделирование исходит из принципов актуализма и самоподобия биоклиматической

системы и основано на пространственных взаимосвязях гидротермических параметров. Эти связи используются, согласно закону эргодичности, для установления временной траектории состояний гео(эко-)систем. В основу прогнозных построений положены современные ландшафтно-геофизические связи в регионе, замыкающиеся на растительном покрове и почвах, а также на первичной биопродуктивности (Коломыц, 2005). Установлено, что замыкающими звеньями в системе региональных связей гидротермических параметров является гидроэдафические признаки (гидроэдафотопы): летние запасы продуктивной влаги в почве и влажность почвы – которые оказывают прямое действующее влияние на распределение фитоценологических и почвенных объектов.

Обнаружены высокие корреляции летних запасов почвенной влаги с двумя климатическими параметрами, фигурирующими в глобальных и региональных климатических прогнозах: со средней температурой июля и годовым количеством осадков (соответственно обратная и прямая экспоненциальные зависимости). Влияние температуры на влагосодержание почвы осуществляется через испаряемость и эвапотранспирацию. Известно также (Высоцкий, 1960), что гидроэдафической фактор является определяющим в пространственной дифференциации биогеосистем малой размерности. Через гидроэдафотопы осуществляется управляющее воздействие глобальной климатической системы на состояние не только региональных, но и локальных природных комплексов (Колесников, 1956).

2. При прогнозных оценках на первые несколько десятков лет с точки зрения времен релаксации объектов первостепенное внимание должно быть уделено не структурной эволюции экосистем, 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 течение года (Коломыц, 2008). Эти характерные времена функциональной релаксации примерно соответствуют продолжительности углеродного цикла в лесных фитомассах (живых и мертвых) и мобильном гумусе почвы (Осипов, 2004). *Функциональная релаксация*

(сдвиги в малом биологическом круговороте) как первоочередная реакция экосистем на внешнее воздействие должна быть *приоритетным объектом геосистемного мониторинга лесов.*

3. Из двух главных метаболических циклов: водно-балансового и биогеохимического, – явный приоритет остается за вторым циклом. Как показал региональный информационный анализ (Коломыц, 2018), структурная перестройка экосистем на три четверти определяется сдвигами в малом биологическом круговороте и лишь на одну четверть зависит от изменений режимов тепло- и 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.

4. Переход лесных экосистем в критическое состояние должен, по-видимому, происходить 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 (Базилевич и Родин, 1971). 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 лишь в результате крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок на специально подобранных для этого модельных полигонах (см. выше). Весь спектр пробных площадей на каждом полигоне должен охватывать свойственное данному экорегиону основное разнообразие геоморфологических условий и почвенно-фитоценологических структур.

БАЗОВОЕ И ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Геоэкологический (в том числе геосистемный) мониторинг основывается на построении дискретных эмпирико-статистических моделей двух типов:

1) теоретико-информационных моделей, вскрывающих тесноту межкомпонентной сопряженности, каналы цепных реакций на внешние возмущения и систему экологических ниш фитоценозов, почв и самих биогеоценозов в пространстве абиотических факторов среды (Арманд, 1975; Пузаченко, Скулкин, 1981);

2) теоретико-множественных моделей (класс моделей дескриптивных, т.е. «размытых», множеств (Андреев, 1980), описывающих с помощью мер сходства – контрастности и мер включения структуру вещественно-энергетических полей;

Эти модели позволяют получать экспресс-информацию о всей системе ландшафтных связей – как вертикальных, так и горизонтальных, что является непреходящей научно-методической задачей как в ландшафтоведении, так и в ландшафтной экологии. Ландшафтно-экологический прогноз основан нами на сочетании обоих типов моделирования (Коломыц, 2018). Путем теоретико-множественных операций с экологическими нишами рассматриваемых объектов ведутся прогнозные расчеты климатогенных изменений этих объектов на заданные сроки. Синтез теоретико-информационных и теоретико-множественных методов моделирования может способствовать также дальнейшему развитию концепции о структурных уровнях ландшафтной организации, опирающейся на понятийную кибернетическую модель природного комплекса как иерархической системы управления (Коломыц, 2018).

Приведем некоторые результаты наших работ в данном направлении. На основе материалов крупномасштабных ландшафтных съемок, проведенных автором на экспериментальных полигонах в Среднем Поволжье, созданы: 1) дискретные эмпирико-статистические модели структурно-функциональной организации лесных биогеоценозов в различных зональных условиях; 2) модели эмпирической имитации регионального биоклиматического тренда экосистемами локального уровня; 3) графо-аналитические модели функционально-структурных преобразований лесных экосистем при заданных сценариях глобальных климатических прогнозов; 4) общая схема-модель, описывающая движущие силы климатогенных сукцессий, т.е. принципиальный механизм перехода от функциональных изменений гео(эко-)систем к их структурным

преобразованиям под воздействием глобального потепления; 5) дискретные модели климатогенных изменений биологического круговорота и углеродного баланса в лесных экосистемах как ведущих факторов биотической регуляции окружающей среды (Коломыц, 2008).

При топологической интерпретации известного фундаментального ландшафтно-геофизического фактора – соотношения тепла и влаги, введен новый комплексный параметр – коэффициент эдафического увлажнения, более адекватно отражающий разнообразие локальных гео(эко-)систем и их множественную реакцию на фоновые климатические сигналы. Изложен метод расчета этого коэффициента. Приведен пример прогноза динамики лесных экосистем по изменениям состояний их гидроэдафотопов при прогнозируемом глобальном потеплении (Коломыц, 2018).

Важной задачей является также рассмотрение путей отображения зональных биоклиматических условий в ландшафтных связях, формирующих природные комплексы локального уровня. Экспериментально показано (Коломыц, 2018), как местные геоморфологические и гидроэдафические факторы преломляют зональный фон и формируют *региональные системы локальной зональности*, состоящие из векторных рядов плакорных и экстразональных биогеоценозов. Благодаря этому, на локальном уровне ландшафтной организации вырисовывается *явление региональной полизональности*, которое может имитировать реакцию топогео(эко-)систем на глобальные изменения климата и может трактоваться как форма этой реакции на фоновые климатические сигналы.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Предлагаемые автором ландшафтно-экологические подходы к геосистемному мониторингу основаны на разработанной им методике численного эколого-географического прогнозирования (Коломыц, 2008, 2018). Методика доведена до рецептурного уровня и может, по-видимому, войти в научно-методический арсенал географической экологии. В ней органично сочетаются, с одной стороны, достаточно строгий формализованный подход к решению прогнозных задач, а с другой, – доступность для широкого круга исследователей

процедуры сбора, обработки и анализа эмпирического материала. В отличие от известных отечественных и зарубежных подходов (Пузаченко, Скулкин, 1981; Tchebakova et al., 1993; Кобак и др. 2002), в данной методике предусмотрен множественный характер трансформации природных комплексов при фиксированном значении климатического тренда. Впервые удалось рассчитать не только вероятности, но и скорости функциональных преобразований ландшафтов и биогеоценозов, что позволило выйти на прогнозные оценки с заданной заблаговременностью. Разработаны два типа прогнозных моделей: хорометрический и хронометрический, – по которым представлены региональные и локальные сценарии климатогенных изменений природных комплексов Русской равнины и Большого Кавказа, в том числе его высокогорий. Перечисленные научно-методические достижения до сих пор они не имеют подобных аналогов ни в нашей стране, ни за рубежом.

Подчеркнем экспериментальный характер самой методики эколого-географического прогнозирования. В расчетных моделях ход прогнозируемых процессов воспроизводится с помощью их *эмпирической имитации* пространственно распределенными параметрами базовых экологических ниш изучаемых объектов. Сам прогноз является по существу *управляемым экспериментом*, по определению (Хелберт, 2008b). Исследователь задает входные параметры в данную операционную систему и получает на выходе картину прогнозируемых структурных и функциональных состояний изучаемых объектов в данной статистической выборке, с выявлением новых вневыборочных объектов. В работах (Коломыц, 2018, 2020) представлены: 1) локальная эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда по моделям бинарной гидро- и термоэдафической ординации лесных топогеосистем; 2) использование свойства полизонности локальных геосистем как способа их реакции на глобальные изменения климата; 3) эмпирическая имитация климатогенных изменений биологического круговорота на основе гидротермического ординационного анализа его параметров; 4) эмпирическая имитация изменений продуктивности и стока углерода в лесных экосистемах при климатических колебаниях (на основе повторных съемок в разные годы на одном и том же полигоне).

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ АДАПТИВНОГО МОНИТОРИНГА

На примере лесов Окско-Волжского бассейна был проведен опыт численного решения двуединой задачи, поставленной Парижским Соглашением по изменению климата (Paris Agreement, 2015): оценить поглощение лесными сообществами CO₂ из атмосферы при современном глобальном потеплении и их адаптацию к изменениям климата. Решение этой задачи направлено на выявление лесных биогеоценозов, а затем и лесных формаций с положительной регуляцией углеродного цикла, которая должна способствовать смягчению потепления (Коломыц, 2020). В качестве показателя адаптации использован индекс лабильной (фитоценотической) упруго-пластичной устойчивости лесных экосистем (Коломыц и др., 2015), характеризующий их сукцессинно-восстановительный потенциал как целостных элементарных хронологических единиц (Сукачев, 1972). С помощью метрики евклидова расстояния проведена процедура расчетов устойчивости лесных биогеоценозов, что позволило выявить метаболическое разнообразие механизмов их адаптации к фоновым климатическим сигналам. Удалось количественно оценить относительный вклад каждого метаболического фактора в запасы гомеостатичности лесных экосистем и провести верификацию расчетных моделей. На основе полученных мер с помощью новых методов геоморфометрии (Shary et al., 2002) рассчитаны карты-матрицы индексов устойчивости лесных биогеоценозов для некоторых экспериментальных полигонов на территории Волжского бассейна, а также карты устойчивости лесных формаций бассейна.

Проведенный анализ региональных соотношений упруго-пластичной устойчивости лесных биогеоценозов и их углеродного баланса по экстремальному сценарию глобального потепления (модель HadCM3), с оценкой вклада в этот баланс различных углеродных пулов, позволил оценить механизмы функционирования экосистем при указанном климатическом тренде и тем самым выявить основные движущие силы положительной или отрицательной регуляции углеродного цикла со стороны лесного покрова, что

имеет непосредственное отношение к заключительному этапу геосистемного мониторинга лесов.

Для модельной территории Окского бассейна методами множественной регрессии даны оценки влияния упруго-пластичной устойчивости лесных образований и прогнозируемых климатических условий на углеродный баланс. Всего получено 11 линейных уравнений, с достаточно высоким уровнем значимости. Сопоставление исходными (базовыми) и конечных (прогнозируемых на 2100 г.) значений углеродного баланса лесных формаций с соответствующими показателями упруго-пластичной устойчивости дает однозначную картину значительного повышения адсорбционной способности бореальных лесов при росте их репродукционного потенциала. Решающий вклад в усиление адсорбции CO₂ вносит рост лесовосстановительной адаптации.

О ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОМ ЭТАПЕ ГЕОСИСТЕМНОГО МОНИТОРИНГА

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. Для достижения глобальных целей устойчивого развития необходима эффективная адаптация природных экосистем к изменениям климата (Богданович, Липка, 2020). 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). Адаптацию и «митигацию» биогеоценозов можно отнести, как уже говорилось, к мониторингу климатической деятельности, согласно (Романовская, 2019).

Решение задач управления лесами чаще всего связывается со сценариями лесопользования, при допущении относительно неизменных величин поглощения углерода различными лесными формациями. Управляемыми считаются леса, подверженные воздействию человека (Филипчук и др., 2016), а в качестве основного фактора изменения в них углеродного баланса рассматривается объем лесозаготовок (Замолотчиков и др., 2014). Климатогенный же мониторинг не касается вопросов лесопользования, по-

этому в нем совершенно иные критерии управления лесами. Здесь речь идет о создании таких лесных сообществ, которые обеспечивают оптимальное регулирование углеродного цикла, что указано, например, в Программе управления лесами Национального парка Сплит-Рок-Лайтхаус в штате Висконсин, США (Ontl et al., 2020).

Эта Программа включает мероприятия, направленные как на поддержание существующего 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 содействия 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 работах (Розенберг и др., 2010; Коломыц, 2020) концепция углеродных балансов и функциональной устойчивости лесных экосистем при глобальных изменениях климата. В этой концепции определена поглощающая и адаптивная способность лесных, главным образом бореальных, биомов Европейской России в условиях современного глобального потепления. Научный поиск велся в соответствии с положениями Парижского Соглашения по изменению климата (Paris Agreement, 2015).

Первые результаты научного поиска *локальных механизмов биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении* состояли в следующем: а) даны прогнозные оценки изменений продукционной и детритной ветвей малого биологического круговорота в лесных экосистемах локального уровня в связи с развитием термоаридного климатического тренда; б) выявлены причинные механизмы климатогенных сдвигов составляющих углеродного баланса в лесных биогеоценозах на основе динамики дискретных параметров метаболизма; в) установлены локальные и региональные

сценарии биотической регуляции углеродного цикла в системе лес – атмосфера и проведена оценка этих сценариев с позиции реализации принципа Ле Шателье. Решение этих задач позволило наметить локальные спектры лесных ассоциаций в различных зонально-региональных условиях, а также группы коренных формаций юга лесного пояса Русской равнины, которые будут способствовать устойчивости наземных экосистем при грядущих глобальных изменениях климата. Особое внимание уделено механизмам и экологическим последствиям биотической регуляции углеродного цикла на зональном экотоне леса и степи, где лесные сообщества изначально находятся в гидротермических условиях, близких к критическим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое направление мониторинговых исследований входит в один из разделов «Федеральной научно-технической Программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений в 2021–2030 годы», утвержденной Правительством Российской Федерации

21 февраля 2021 года, № 133. В данном разделе предусмотрено создание наукоемких и технологических решений, направленных на раскрытие механизмов адаптации наземных экосистем к климатическим изменениям и их последствиям с помощью мониторинга и прогнозирования состояния климата и природной среды, в целях обеспечения ее экологической безопасности.

Изложенная стратегия комплексного применения ландшафтного подхода и методов биогеоценологии к количественным оценкам экологических последствий глобальных изменений климата направлена на раскрытие феномена биотической регуляции углеродного цикла лесными биогеосистемами. Эмпирико-статистические модели должны описать пространственное многообразие локального и регионального отклика лесного покрова на климатические сигналы, а также динамику его углеродного обмена с атмосферой, что позволит оценить вклад бореальных и неморальных лесов в смягчение современного глобального потепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список русскоязычной литературы

- Андреев В.Л.** Классификационные построения в экологии и систематике. М.: Наука, 1980. 142 с.
- Арманд А.Д.** Информационные модели приростных комплексов. М.: Наука, 1975. 126 с.
- Базилевич Н.И., Родин Л.Е.** Продуктивность и круговорот элементов в естественных и культурных фитоценозах (по материалам СССР) // Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. М.: Наука, 1971. С. 5-32.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А.** Развитие методологии спутникового картографирования лесных экосистем Северной Евразии // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. Книга 1 / под ред. А.С. Исаева. М.: КМК, 2012. С. 261-296.
- Барталев С.А., Исаев А.С.** Современные возможности спутникового мониторинга динамики лесных бореальных экосистем северной Евразии. // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты. Петрозаводск, 2004. С. 11-19.
- Виноградов Б.В.** Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 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.
- Герасимов И.П.** Научные основы современного мониторинга окружающей среды // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1975. № 3. С. 13-26.
- Герасимов И.П.** Биосферные станции-заповедники, их задачи и программа деятельности // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1978. № 2. С. 5-17.
- Герасимов И.П., Грин А.М.** Экспериментальный полигон для изучения природных и антропогенных геосистем центральной части лесостепи Русской равнины (характеристика, программа, первые результаты) // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1976. № 1. С. 18-28.
- Заварзин Г.А.** (ред.). Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Израэль Ю.А.** Экология и контроль состояния природной среды. Изд. 2-е, доп. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 560 с.
- Израэль Ю.А., Семенов С.М., Хачатуров М.А.** Биоклиматологические аспекты комплексного глобального мониторинга // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XV. Л.: Гидрометеиздат, 1993. С. 8-20.

- Исаев А.С.** Использование аэрокосмических методов для изучения лесов // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы. Труды III Международного симпозиума. Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 47-52.
- Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Турчинович И.Е.** Влияние изменений климата на зональность и экосистемы России // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 205-210.
- Колесников Б.П.** Кедровые леса Дальнего Востока / Труды Дальневост. фил. АН СССР. Т. 2 (4). М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 263 с.
- Коломыц Э.Г.** Бореальный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
- Коломыц Э.Г.** Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
- Коломыц Э.Г.** Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. М.: КМК, 2018. 716 с.
- Коломыц Э.Г.** Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем. Экологические ресурсы бореальных лесов. М.: Наука, 2020. 423 с.
- Коломыц Э.Г., Керженцев А.С., Шарая Л.С.** Аналитические и картографические модели функциональной устойчивости лесных экосистем // Успехи совр. биологии. 2015. Т. 135, № 1. С. 127-149.
- Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В.** Естественно-научные основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ; Ин-т географии РАН, 2003. 239 с.
- Котляков В.М.** География и выживание человечества // Изв. РАН. Сер. геогр. 1992. № 2. С. 8-14.
- Крапивин В.Ф., Свирижев Ю.М., Тарко А.М.** Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М.: Наука, 1982. 272 с.
- Крауклис А.А.** Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
- Осипов В.В.** (ред.). Экосистемы Теллермановского леса / Институт лесоведения РАН. М.: Наука, 2004. 340 с.
- Пегов С.А., Крутько В.Н., Мельникова Г.Л., Никитин Е.В.** Моделирование глобальных природных процессов // Вопросы географии. Сб. 127. М.: Мысль, 1986. С. 41-46.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С.** Структура растительности лесной зоны СССР: Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.
- Розенберг Г.С.** Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984. 265 с.
- Романовская А.А.** Потребности и пути развития мониторинга адаптации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. XXIX, № 1. С. 107-125.
- Соколов В.Е., Базилевич Н.И.** (ред.). Теоретические основы и опыт экологического мониторинга. М.: Наука, 1983. 253 с.
- Сочава В.Б.** Геотопология как раздел учения о геосистемах // Топологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 3-86.
- Сочава В.Б.** Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Сукачев В.Н.** Избранные труды. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. 418 с.
- Тимофеев-Ресовский Н.В.** Структурные уровни биологических систем // Системные исследования. Ежегодник 1970. М.: Наука, 1970. С. 80-113.
- Тишков А.А.** Подходы к исследованиям динамики биоты как объекта географического прогнозирования // Географическое прогнозирование и природоохранные проблемы. М.: Ин-т географии АН СССР, 1988. С. 49-60.
- Хелберт С.Х.** Мнимые повторности и планирование экологических полевых экспериментов // Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений). Тольятти: Ин-т экологии Волжского бассейна РАН. 2008а. С. 9-45.
- Хелберт С.Х.** Неверное истолкование мнимых повторностей и сопутствующие проблемы: ответ Л. Оксанену // Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений). Тольятти: Ин-т экологии Волжского бассейна РАН. 2008b. С. 61-65.
- Хорошев А.В.** Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Изд-во КМК, 2016. 416 с.

Reference List

- Andreev V.L.** Classification constructions in ecology and systematics. Moscow: Nauka, 1980. 142 p. (In Russian).
- Armand A.D.** Information models of natural complexes. Moscow: Nauka, 1975. 126 p. (In Russian).
- Bazilevich N.I., Rodin L.E.** Productivity and circulation of elements in natural and cultural phytocenoses (according to the materials of the USSR) // Biological productivity and circulation of chemical elements in plant communities. Moscow: Nauka, 1971. P. 5-32. (In Russian).
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Luryan E.A.** Development of methodology for satellite mapping of forest ecosystems in Northern Eurasia // Diversity and dynamics of forest ecosystems in Russia. Book 1 / ed. A.S. Isaev. Moscow: KMK, 2012. P. 261-296. (In Russian).
- Bartalev S.A., Isaev A.S.** Modern capabilities of satellite monitoring of the dynamics of forest boreal ecosystems in Northern Eurasia. // Anthropogenic transformation of European taiga ecosystems: environmental, resource and economic aspects. Petrozavodsk, 2004. P. 11-19. (In Russian).
- Vinogradov B.V.** Fundamentals of landscape ecology. Moscow: GEOS, 1998. 418 p. (In Russian).

- Vysotsky G.N.** Selected Works Moscow: Selkhozgiz, 1960. 435 p. (In Russian).
- Gerasimov I.P.** Ecological problems in the past, present and future geography of the World. Moscow: Nauka, 1985. 247 p. (In Russian).
- Gerasimov I.P.** Scientific foundations of modern environmental monitoring // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geographic series. 1975. No. 3. P. 13-26. (In Russian).
- Gerasimov I.P.** Biospheric stations-reserves, their tasks and activity program // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geographic series. 1978. No. 2. P. 5-17. (In Russian).
- Gerasimov I.P., Grin A.M.** Experimental test site for the study of natural and anthropogenic geosystems in the central part of the forest-steppe of the Russian Plain (characteristics, program, first results) // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geographic series. 1976. No. 1. P. 18-28. (In Russian).
- Zavarzin G.A.** (editor). Pools and flows of carbon in terrestrial ecosystems of Russia. Moscow: Nauka, 2007. 315 p. (In Russian).
- Israel Yu.A.** Ecology and control of the state of the natural environment. Edition 2, supplemented. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 560 p. (In Russian).
- Israel Yu.A., Semenov S.M., Khachaturov M.A.** Bioclimatological aspects of integrated global monitoring // Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. Vol. XV. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1993. P. 8-20. (In Russian).
- Isaev A.S.** The use of aerospace methods for the study of forests // Comprehensive global monitoring of the state of the biosphere. Proceedings of the III International Symposium. T. 2. L.: Gidrometeoizdat, 1986. P. 47-52. (In Russian).
- Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchinovich I.E.** Influence of climate change on zoning and ecosystems in Russia // Climate change and their consequences. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 205-210. (In Russian).
- Kolesnikov B.P.** Cedar forests of the Far East // Proceedings of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences. Vol. 2 (4). Moscow; Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956. 263 p. (In Russian).
- Kolomyts E.G.** Boreal ecotone and geographic zonality: Atlas-monograph. Moscow: Nauka, 2005. 390 p. (In Russian).
- Kolomyts E.G.** Local mechanisms of global changes in natural ecosystems. Moscow: Nauka, 2008. 427 p. (In Russian).
- Kolomyts E.G.** Experimental geographical ecology. Notes of a naturalist geographer. Moscow: KMK, 2018. 716 p. (In Russian).
- Kolomyts E.G.** Carbon balance and sustainability of forest ecosystems. Ecological resources of boreal forests. Moscow: Nauka, 2020. 423 p. (In Russian).
- Kolomyts E.G., Kerzhentsev A.S., Sharaya L.S.** Analytical and cartographic models of the functional stability of forest ecosystems // Successes of modern biology. 2015. Vol. 135, no. 1. P. 127-149. (In Russian).
- Kondratiev K.Ya., Losev K.S., Ananicheva M.D., Chesnokova I.V.** Natural-scientific foundations of life sustainability. Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information; Institute of Geography RAS, 2003. 239 p. (In Russian).
- Kotlyakov V.M.** Geography and the survival of mankind // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic series. 1992. No. 2. P. 8-14. (In Russian).
- Krapivin V.F., Svirezhev Yu.M., Tarko A.M.** Mathematical modeling of global biospheric processes. Moscow: Nauka, 1982. 272 p. (In Russian).
- Krauklis A.A.** Problems of experimental landscape science. Novosibirsk: Nauka, 1979. 232 p. (In Russian).
- Osipov V.V.** (editor). Ecosystems of the Tellerman Forest / Institute of Forestry RAS. Moscow: Nauka, 2004. 340 p. (In Russian).
- Pegov S.A., Krutko V.N., Melnikova G.L., Nikitin E.V.** Modeling of global natural processes // Questions of Geography. Collection 127. Moscow: Thought, 1986. P. 41-46. (In Russian).
- Puzachenko Yu.G., Skulkin V.S.** Vegetation structure of the forest zone of the USSR: System analysis. Moscow: Nauka, 1981. 275 p. (In Russian).
- Rosenberg G.S.** Models in phytocenology. Moscow: Nauka, 1984. 265 p. (In Russian).
- Romanovskaya A.A.** Needs and ways of development of adaptation monitoring // Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. 2018. Vol. XXIX, no. 1. P. 107-125. (In Russian).
- Sokolov V.E., Bazilevich N.I.** (editors). Theoretical foundations and experience of environmental monitoring. Moscow: Nauka, 1983. 253 p. (In Russian).
- Sochava V.B.** Geotopology as a section of the doctrine of geosystems // Topological aspects of the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Nauka, 1974. P. 3-86. (In Russian).
- Sochava V.B.** Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Nauka, 1978. 319 p. (In Russian).
- Sukachev V.N.** Selected works. Volume 1. Fundamentals of forest typology and biogeocenology. Leningrad: Nauka, 1972. 418 p. (In Russian).
- Timofeev-Resovsky N.V.** Structural levels of biological systems // System Research. Yearbook 1970. Moscow: Nauka, 1970. P. 80-113. (In Russian).
- Tishkov A.A.** Approaches to the study of biota dynamics as an object of geographic forecasting. Geographical Forecasting and Environmental Problems. Moscow: Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR, 1988. P. 49-60. (In Russian).
- Helbert S.H.** Imaginary repetitions and planning of ecological field experiments // Problems of ecological experiment (planning and analysis of obser-

vations). Togliatti: Institute of Ecology of the Volga Basin RAS. 2008a. P. 9-45. (In Russian).

Helbert S.H. Misinterpretation of imaginary repetitions and related problems: a response to L. Oksanen // Problems of ecological experiment (planning and analysis of observations). Togliatti: Institute of Ecology of the Volga Basin RAS. 2008b. P. 61-65. (In Russian).

Khoroshev A.V. Polyscale organization of the geographical landscape. Moscow: KMK Publishing House, 2016. 416 p. (In Russian).

Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H. Vegetation Response to Climate Change in the Alps: Modeling Studies // Views from the Alps: regional perspectives on climate change. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1998. P. 309-350.

Ontl T.A., Janowiak M.K., Swanston C.W. et al. Forest Management for Carbon Sequestration and

climate adaptation // Journal of Forestry. 2020. Vol. 118, no 1. P. 86-101.

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

Schimal D.S., House J.I., Hibbard K.F. et al. Recent pattern and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems // Nature. 2002. Vol. 414, no. 8. P. 169-172.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107, no. 1-2. P. 1-32.

Tchebakova N.A., Monserud R.A., Leemans R., Golovanov S. A global vegetation model based on the climatological approach of Budyko // Journal of Biogeography. 1993. Vol. 20. P. 129-144.

LANDSCAP-ECOLOGICAL BACKGROUND FOR FOREST GEOSYSTEM MONITORING BY TREND OF MODERN GLOBAL WARMING

© 2022 E.G. Kolomyts

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

Annotation. The landscape-ecological approach to geosystem monitoring of forest cover is based on the geocological concept "Global changes at the local level" developed earlier by the author. The proposed research strategy is presented in the form of an experimental geo-ecological analysis, with the implementation of a complete triad of environmental monitoring of forest ecosystems "observation – forecast – management". The scientific-methodological foundations of the concept of geosystem monitoring are characterized. The advantages and disadvantages of discrete empirical-statistical predictive modeling of geo(eco)systems are noted. The recommended basic and predictive models based on the materials of large-scale landscape surveys are described. It has been established that the closing links in the system of geophysical connections are hydro-edaphic features that have a direct effect on the distribution of phytocoenological and soil objects and serve as the main link in the transmission of climatic signals from the global and regional levels to the local. One of the guiding monitoring tools can be a regional system of local zonality of natural complexes, which is able to simulate their response to global climate change. In the adaptive aspect of monitoring, covering observation and forecasting, it is recommended to use a measure of the functional elastic-plastic stability of forest ecosystems, which characterizes their succession-restoration potential. At the final stage "management (feedback)", an example is given of predictive estimates of the ecological resources of the forest cover of the Volga River basin as its ability to additionally absorb greenhouse gases using the mechanisms of regulation of the carbon cycle under climate change, which is directly related to the mitigation of modern global warming.

Key words: forest ecosystems, global climate change, geosystem monitoring, landscape-ecological experiment, basic and predictive empirical-statistical modeling.