

## ПРОГНОЗНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ (ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД)

© 2013 Л.С. Шарая

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

Поступила в редакцию 17.03.2013

Рассматриваются методы крупно- и среднемасштабного картографирования прогнозируемых состояний лесных экосистем при глобальном изменении климата. Прогнозные карты функциональных и структурных преобразований в лесных массивах представляют собой рассчитанные матрицы, визуализированные в ГИС-программах. Представленные методы расчета прогнозных карт отличаются способом интерполяции и экстраполяции данных, использованием в качестве пространственных и временных предикторов матриц: 1 – типов местоположений, 2 – изучаемой характеристики для базового периода, 3 – прогнозируемых гидротермических характеристик, 4 – показателей устойчивости экосистемы. Показано, что рельеф может значительно модифицировать узоры характеристик лесов, которые прогнозируются с использованием только климатических изменений. Подходы иллюстрируются примерами прогнозных карт для лесных экосистем Приокско-Тerrasного заповедника и Северного Кавказа.

Ключевые слова: пространственное моделирование, биогеоценоз, геоморфометрия, типы местоположений, множественная регрессия, верификация.

### КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ОСНОВА

Ландшафтно-экологическое картографирование считалось и главной целью и основным инструментом исследования ландшафтной экологии, в известном ее определении Карла Тролля [34], который полагал, что узоры в ландшафте – суть интегральное выражение «сложных причинно-следственных связей между живыми сообществами и окружающей их средой». Целью – потому что итоги исследования должны выражаться картами, представляющими природные закономерности изменения характеристик экосистемы в пространстве. Средством – потому что всякий этап изучения связей нуждается в пространственно распределенных данных о других по отношению к изучаемому свойству факторах окружающей среды или биотических показателей экосистемы. Изучению связей внутри лесных экосистем разных уровней посвящен впечатляющий ряд концептуальных и экспериментальных исследований отечественной школы ландшафтоведения [1, 5, 6, 10, 13 и др.]. Однако ранее составление карт, отражающих эти связи, было затруднительно как по причине недоступности подробных матриц факторов среды, так и из-за отсутствия или недостаточной разработанности соответствующих методов расчета.

Положение в этой области сильно изменилось, когда исследователям стали доступны подробные матрицы многих экологических факторов, таких как вегетационный индекс, первичная продуктивность, рельеф, климат и другие. С развитием растровых Географических Информационных Сис-

тем (ГИС) стало возможным представление самих карт ландшафтной мозаики или узоров при использовании постоянно развивающихся методов интерполяции и экстраполяции измеренных данных. Существенный недостаток таких методов заключается в том, что интерполяцию между точками исходной выборки и экстраполяцию за пределы их границ проводят различными, часто необоснованными способами, которые порой не способны учесть и отразить реальный характер изменений этих характеристик в пространстве.

Развиваемые нами количественные подходы к прогнозному картографированию основываются на следующих концептуальных схемах. Принятие в качестве элементарной структурной и функциональной единицы системы биогеоценоза (*концепция биогеоценологии В.Н. Сукачева*), анализ закономерностей пространственной организации и согласования этих типологических единиц, а также соответствующих им метаболических показателей приводят к возможности рассмотрения локальных механизмов в биогеоценозах как слагаемых глобальных биогеохимических круговоротов и биогеографических структур (*идея биохорологии В.Н. Тимофеева-Ресовского*). Такой взгляд на организацию экосистем вместе с некоторыми принципами структурно-динамического ландшафтоведения В.Б. Сочавы является отправной базой *прогнозной топо-экологической концепции Э.Г. Коломыц* [7, 8]. В тех случаях, когда данные не позволяют оперировать непосредственно биогеоценозами, могут использоваться другие виды типизации растительности лесных экосистем.

Экологические прогнозы для планетарного или достаточно большого регионального размера обычно используют связи ландшафтно-зональных систем с температурой воздуха и осадками. Однако построение прогнозных моделей с пространст-

Шарая Лариса Станиславовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.  
E-mail: l\_sharaya@mail.ru

венно распределенными параметрами для сравнительно небольших региональных экосистем не может ограничиться использованием фоновых климатических предикторов. Прогнозная топоэкологическая концепция эмпирически обосновывает, что основной пропускной канал связей структурно-функциональных характеристик топогеосистем с климатом проходит через летнее влагосодержание почвы, которое является наиболее мощным экологическим фактором их территориальной организации и преобразований. Основанные на этой концепции эмпирико-статистические модели формируют информацию о преобразованиях лесных экосистем во времени под влиянием климатических трендов из рядов пространственных данных о катенарных сопряжениях и их связях с локальными характеристиками гидротермического режима [8]. Такой подход позволяет прогнозировать закономерности поведения лесных сообществ в различных геоморфологических и эдафических условиях для разных зон на основе собираемой в поле массовой эмпирической информации. Эмпирико-статистические модели имеют важное преимущество по сравнению с имитационными моделями. Например, разные имитационные модели разных авторов, примененные к одной и той же местности, способны давать противоречивые результаты, от сурового вымирания лесов до благоприятных условий для их развития [25], а сравнение разных эмпирико-статистических моделей показывает близкие результаты [21]. Поэтому стремление к объективности ведет к предпочтению эмпирико-статистических моделей [22].

Одна из сильных сторон наших методов связана также с использованием нового пула абиотических экологических факторов – морфометрических величин [31], взятых из *геоморфометрии* – науки о количественном анализе земной поверхности. Этот пул включает в себя 18 количественных характеристик рельефа, с определенным для каждой физическим смыслом. В частности, давно осознана связанная с рельефом важность микроклимата для лесных экосистем [например, 14, 18, 24]. Некоторые исследователи для достижения сопоставимости результатов по изменению лесов во времени направленным образом выбирают макросклоны только одной экспозиции [20]. Расширенный набор морфометрических величин (МВ), который используется нами, содержит освещенность склонов – характеристику с изменяемым параметром азимута Солнца, – которая часто является значимым фактором при исследовании мозаики лесных экосистем. Включение в анализ всего списка этих величин (из которых при анализе объективно отбираются несколько ведущих) позволяет обнаруживать ранее неизвестные пространственные закономерности. Важная роль рельефа как распределителя света, тепла, влаги,

солей и твердого стока отмечена еще в ранних работах [11, 12]. С этой мыслью трудно спорить, можно только заметить, что в этом утверждении за рельефом предполагается управляющая функция по отношению к важнейшим экологическим факторам: свету, теплу, влаге, водным и литодинамическим потокам. Трудоемкость и практическая невозможность проведения измерений прямых факторов среды для большого числа площадок часто обуславливают целесообразность замены их матрицами МВ, описывающих различные аспекты действия рельефа. Рельеф простым образом заменяет множество прямых факторов среды [22].

Прогнозная топо-экологическая концепция [8], расширенный набор характеристик рельефа и адаптированный для целей экологии регрессионный анализ [17] составляют основу наших методов *прогнозного ландшафтно-экологического картографирования* лесных экосистем. Значительное отличие этих методов от других состоит в способах интерполяции и экстраполяции измеренных или рассчитанных данных. На первом этапе в нашем количественном подходе проводится статистический анализ связей между характеристиками экосистемы и внешними по отношению к ним факторами среды. На основе выявленных связей в пределах выбранной местности изучаемые данные интерполируются и экстраполируются. Эти процедуры *обоснованы статистической значимостью* каждого пространственного предиктора. В этом смысле, и по результатам верификации (см. ниже), полученная пространственная модель с указанием соответствующих статистических критериев может рассматриваться как надежная, а построенная по ней карта представляет собой визуализированную матрицу, где в каждом элементе содержится рассчитанное значение изучаемого свойства.

### КРУПНОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Известно, что ландшафтные узоры или мозаики меняются во времени, следуя изменяющимся факторам среды. В нашем подходе для расчета *прогнозных карт* мы оперируем матрицами факторов, как меняющихся во времени, так и не меняющихся, по меньшей мере в ближайшие 50-100 лет. О роли последних, как консервативных или тормозящих, находящихся в определенном противостоянии с движущими силами климатогенных реакций, в литературе по количественному анализу известно крайне мало.

При рассмотрении таких консервативных факторов оказывается полезной концепция ландшафтных сопряжений типов местоположений М.А. Глазовской [3]. В ней, однако, учтен только профиль склона, и поэтому она модифицирована нами [16] на учет различий в экспозиции склонов,

а также гидрологически важных изменений рельефа в плане. Статистическая значимость модифицированных типов местоположений для пространственной организации различных характеристик лесных экосистем не предполагалась, а выявлялась статистическими методами нелинейной множественной регрессии. В результате таких анализов нами обосновано положение о базовой роли типов местоположений в дифференциации лесных экосистем. В прогнозном анализе мы сталкиваемся со множеством климатогенных реакций в разных типах местоположений, но сами геотопы и их сопряжения при рассмотрении ближайших 50-100 лет останутся инвариантами во времени. Экосистемы будут меняться под влиянием изменения климата, но их прогнозируемая пространственная организация по-прежнему будет существенно определяться типами местоположений. Поэтому найденная матрица типов местоположений важна не только для расчета базовых характеристик, но и прогнозных состояний изучаемой экосистемы.

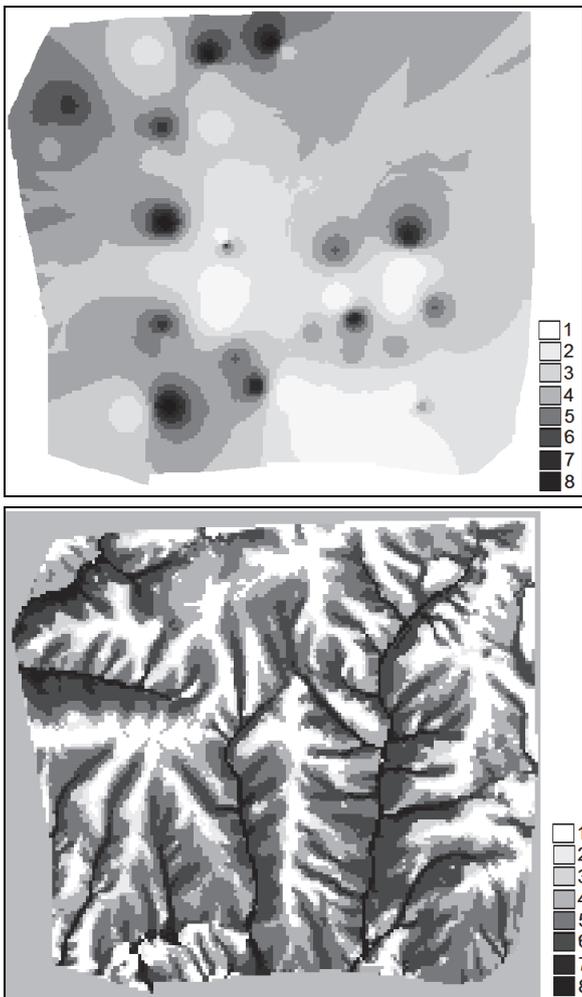


Рис. 1. Карты модифицированных типов местоположений Приокско-Террасного заповедника, интерполированные по одним и тем же точкам наблюдения двумя разными способами. Легенда показывает нумерацию типов по [16]. Пояснения в тексте.

На рис. 1 показаны две карты модифицированных типов местоположений для Приокско-Террасного заповедника (ПТЗ), рассчитанные двумя разными способами. В одном способе интерполяция и экстраполяция измеренных данных осуществлялись с применением популярного метода обратных расстояний (IDW) в программе ArcView (рис. 1, наверху). В другом способе – с помощью матриц характеристик рельефа как факторов среды (уравнение (1)), с которыми была обнаружена наиболее тесная связь типов местоположений (рис. 1, внизу). Результаты кардинально различны: из-за необоснованности интерполяции в первом случае (методом IDW) не выявляется структурная целостность природного ландшафта, в то время как подход с использованием рельефа позволяет непосредственно видеть на карте пространственную организацию (сопряжение) геотопов и ее связь с характеристиками ландшафта: долинами рек (темные области), плакорами (белые) и т.д.

Регрессионная модель связи местоположений (МПЛ) с рельефом для ПТЗ имеет вид  $\ln MПЛ_{ПТЗ} = 1.471 \cdot I_1 \cdot MCA_{+11.44}^{\Pi} + 24.77 \cdot MCA_{+4.77}^{\Pi} - 0.1149 \cdot TI_{-2.74} - 0.06114 \cdot F(35,160)_{-2.19} - 18.15$ ;  $R^2 = 0.887$  ( $Degr = 3.0\%$ ),  $P < 10^{-6}$ , (1) где  $I_1$  есть описывающий неколичественный фактор среды индикатор [27], отделяющий плакоры от других участков местности (для этого отделения использовались площадь сбора и крутизна,  $I_1 = 0$  для плакоров и 1 вне плакоров),  $MCA$  есть площадь сбора,  $TI$  – топографический индекс влажности почв,  $F(35,160)$  – освещенность склонов при азимуте  $160^\circ$  и склонении Солнца  $35^\circ$ . Здесь и далее нижние индексы есть  $t$ -статистики, показывающие, в данном случае, что все предикторы в модели значимы. Верхний индекс  $\Pi$  означает, что МВ была нелинейно преобразована по формулам [17].  $Degr$  есть используемый при верификации модели по методике кросс-валидации Аллена [19] показатель деградации модели при предсказаниях в новых точках наблюдения. В качестве критерия успешности проверки модели принят эмпирический критерий  $Degr < 50\%$  [17].

Важным моментом при прогнозном картографировании лесных экосистем оказывается также учет характеристик их устойчивости. Для количественной оценки последней на базовый срок были введены индексы резистентной  $I_{рез}$  и упругой  $I_{упр}$  устойчивости, в основе расчета которых лежит соотношение между скоростями процессов синтеза и деградации, которые рассчитываются из полученных в полевых измерениях данных [9]. Эти индексы оказываются в ряде случаев ведущими факторами в прогнозных моделях регрессии. Покажем это на примере общих запасов ор-

ганического углерода и их прогнозируемых изменений.

Уравнение регрессии на базовый срок для запасов углерода в ПТЗ ( $C_{\text{БАЗ\_ПТЗ}}$ ) имеет вид  $C_{\text{БАЗ\_ПТЗ}} = -0.001350 \cdot (W_{50} - W_{50\text{CP}})^2_{-32.26} + 3.246 \cdot T_{50}_{+7.95} - 25.32 \cdot I_{\text{упр}}_{-3.42} - 2.417 \cdot [\ln(MПЛ) - \ln(MПЛ)_{\text{CP}}]_{-2.63}^2 + 190.6;$   
 $R^2 = 0.980$  ( $Degr = 0.4\%$ ),  $P < 10^{-6}$ ,

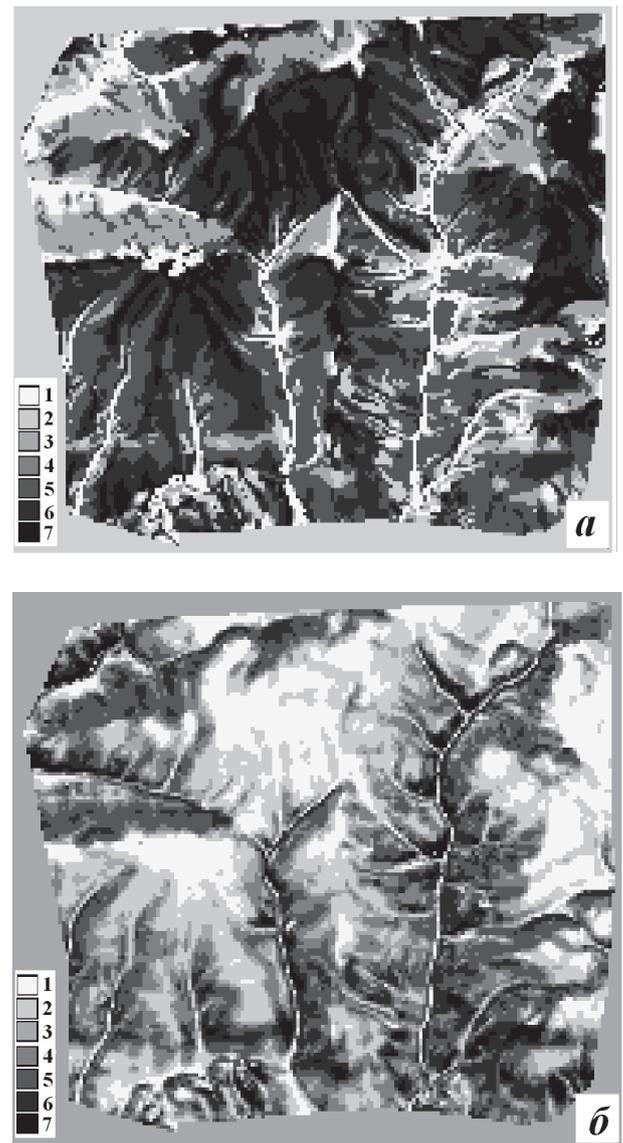
(2) из которого следует, что запасы углерода в экосистеме: а) имеют нелинейную связь с почвенными влагозапасами в слое 0-50 см (член  $-(W_{50} - W_{50\text{CP}})^2$ ), которая приводит к снижению запасов углерода при малом и большом эдафическом увлажнении, б) увеличиваются с ростом температуры почвы на глубине 50 см ( $+T_{50}$ ), в) снижаются в биогеоценозах с высокими значениями индексов упругой устойчивости ( $-I_{\text{упр}}$ ), г) уменьшаются в элювиальных и аккумулятивных местоположениях ( $-\ln(MПЛ) - \ln(MПЛ)_{\text{CP}}$ ). Здесь и далее нижний индекс CP означает среднее по выборке. Запасы  $C_{\text{БАЗ\_ПТЗ}}$  выражены в т/га. Все факторы среды значимы в модели, при главной роли запасов влаги в полуметровом слое почвы, и 98% пространственной изменчивости запасов  $C_{\text{БАЗ\_ПТЗ}}$  объясняется этими факторами. Верификация модели показала очень низкую ее деградацию в новых точках наблюдения ( $Degr = 0,4\%$  с критерием  $Degr < 50\%$ ). Матрицы запасов влаги, температуры, индекса упругой устойчивости и модифицированных типов местоположений рассчитывались по рельефу. Это позволило построить предсказательную карту запасов  $C_{\text{БАЗ}}$  для ПТЗ (рис. 2а).

Для оценки прогнозируемых значений содержания влаги в точках наблюдения использовался следующий подход. По результатам измерений содержания влаги на восьми полигонах Среднего Поволжья и данным о современном климате там же выявлялась статистическая связь между этими запасами и характеристиками климата. Методика и полученные регрессионные модели подробно описаны в [8]. По этим моделям рассчитывались прогнозируемые на 2050 год моделью E GISS [30] температура почв и запасы влаги  $W_{50G50}$  (нижний индекс означает климатический сценарий и прогнозный срок) в точках наблюдения для слоя почвы 0-50 см в ПТЗ на прогнозный период.

Для оценки баланса углерода  $\Delta C$  (т.е. суммарного изменения углерода, положительного в случае депонирования и отрицательного при эмиссии) в точках наблюдения на прогнозные сроки использовались результаты расчетных моделей, описывающих изменения параметров малого биологического круговорота в биогеоценозах региональных экосистем под влиянием трендов температуры и влагосодержания почвы в вегетационный период [8] и известный лесоводственный метод [15]. Затем строилась регрессионная

модель связи найденных в точках значений  $\Delta C$  с факторами среды.

Модель изменения баланса углерода для Приокско-Террасного заповедника ( $\Delta C_{G50\_ПТЗ}$ ) по климатическому сценарию E GISS на 2050 г., характеризующемуся гумидным трендом с небольшим похолоданием, с использованием индекса упругой устойчивости, имеет следующий вид  $\Delta C_{G50\_ПТЗ} = -20.00 \cdot \ln W_{50G50-5.35} + 143.2 \cdot I_{\text{упр}}_{+2.73} + 20.46 \cdot k_{he}^I_{+2.13} - 6.138 \cdot I_1 \cdot \cos A_0 \cdot GA_{-2.04} - 17.62;$   
 $R^2 = 0.529$  ( $Degr = 16\%$ ),  $P < 10^{-6}$ .



**Рис. 2.** Карты распределения базовых запасов (а) и баланса углерода по территории Приокско-Террасного заповедника к 2050 г. по климатической модели GISS E (б), рассчитанные по моделям (2) и (3), соответственно. Легенда для карты а: 1 – 103–195, 2 – 195–202, 3 – 202–204, 4 – 204–205, 5 – 205–208, 6 – 208–210, 7 – 210–238 т/га; для карты б: 1 – (–172)–(–27), 2 – (–27)–(–14), 3 – (–14)–(–8), 4 – (–8)–0, 5 – 0–9, 6 – 9–24, 7 – 24–122 т/га.

Средний баланс по всей территории ПТЗ отрицателен,  $-2,86$  т/га, то есть будет наблюдаться сравнительно небольшое преобладание эмиссии над депонированием. Модель показывает, что эмиссия углерода ( $-\Delta C_{G50}$ ) на территории заповедника будет связана с прогнозируемыми высокими влагозапасами в полуметровом слое почвы (член  $-\ln W_{50G50}$ ) и низкими значениями упругой устойчивости ( $+I_{упр}$ ). Депонированию углерода ( $+\Delta C_{G50}$ ) при этом способствуют высокая расчлененность рельефа ( $+khe$ ) и крутые южные склоны вне плакоров ( $-I_1 \cdot \cos A_0 \cdot GA$ ). Прогнозная карта  $\Delta C_{G50}$  для ПТЗ показана на рис. 26.

В отличие от E GISS, сценарию модели HadCM3 [28] в ПТЗ отвечают потепление и аридизация, а прогнозируемый на 2075 год баланс ( $\Delta C_{H75\_ПТЗ}$ ) для всего экорегиона ПТЗ положителен (то есть преобладает депонирование углерода), при среднем по ПТЗ  $14,0$  т/га. Сравнение участков с положительными ( $\Delta C_{H75\_ПТЗ}$ ) с группами биогеоценозов показывает, что депонирование будет поддерживаться главным образом за счет гидроморфных хвойных и мелколиственных лесов в речных долинах и междуречных западинах.

Примером модели, в которой используются базовые запасы для расчета прогнозируемого баланса изменения запасов углерода, является модель для Национального парка Самарская Лука по климатическому сценарию E GISS на 2050 год

$$\Delta C_{G50\_CL} = -0.7700 \cdot C_{BASE\_CL-14.76} - 18.86 \cdot T_{100G50-4.95} - 487.5 \cdot MDA_{-3.81}^{II} - 2.256 \cdot GA_{-3.14} + 813.8; \\ R^2 = 0.873 \text{ (Degr} = 23.5\%), P < 10^{-6}. \quad (4)$$

Из этого уравнения следует, что прогнозируемая эмиссия (отрицательные значения  $\Delta C_{G50\_CL}$ ) будет наибольшей в случае больших запасов базового углерода (член  $-C_{GBASE\_CL}$ ) и высоких значений прогнозируемой почвенной температуры на метровой глубине ( $-T_{100G50}$ ). Заметим, что одновременно с этим некоторые характеристики рельефа играют консервативную (тормозящую) роль по отношению к эмиссии. Так, при мало измененных значениях запасов базового углерода и температуры почвы, потери будут снижаться на участках с небольшой дисперсивной площадью ( $-MDA$ ) в оврагах и балках, а также на пологих склонах ( $-GA$ ). В этой модели (4) прогнозируемый запас углерода в значительной мере определяется запасами углерода на базовый период ( $C_{BASE\_CL}$ ), что показывают  $t$ -статистики (нижний числовой индекс при каждом предикторе) в уравнении. Выявленные связи показывают, что потери углерода в экосистеме будут происходить в первую очередь там, где накоплены значительные запасы его и где одновременно существенно повысится прогнозируемая температура.

Отметим, что если модели на базовый период можно верифицировать (что редко делается в ли-

тературе), то на прогнозный срок их проверка невозможна. В случаях, когда известны данные о лесной экосистеме и климате за десятки лет [например, 20], возможна дополнительная проверка или калибровка модели по данным прошлых лет [32], но такие многолетние измерения сравнительно редки, и даже при их использовании зависимость прогнозного моделирования от климатических сценариев все же остается.

### РАСЧЕТ ПРОГНОЗНЫХ КАРТ СРЕДНЕГО МАСШТАБА ДЛЯ ГОРНЫХ ЛЕСОВ

Другой подход для прогноза состояний лесных экосистем реализован для бассейна р. Кубань на Северном макросклоне Большого Кавказа с использованием данных дистанционного зондирования и показаний метеостанций. Суть его состоит в получении пространственно-временных моделей нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI для разных типов леса, основывающемся на связях NDVI с климатическими показателями и рельефом. NDVI характеризует среднее за данный период времени количество хлорофилла в растительности [23], то есть фотосинтетическую активность лесов. Мы полагаем, что этот показатель отражает функциональную активность лесов. Для расчета прогнозных карт NDVI использовали полученные уравнения связей и матрицы прогнозируемых климатических факторов, допуская при этом, что выявленный характер связей растительности с климатом будет сохраняться в ближайшие 50 лет.

В изучении растительности Кавказа пока недостаточно внимания уделяется использованию больших массивов спутниковых данных. В нашем исследовании были использованы данные об NDVI за лето 2001 года (<http://terrante.iki.rssi.ru/>), электронная Карта лесов России [2] и данные о рельефе SRTM30 [29].

Средние за 40 лет многолетние климатические показатели по 67 метеостанциям и 38 гидропостам [4] Северного макросклона Большого Кавказа были интерполированы по рельефу для получения климатических матриц с шагом решетки 500 м. Прогнозная климатическая модель E GISS для 2050 года этой же подробности была сформирована интерполяцией исходных неподробных данных (для получения матрицы с размером элемента  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ), затем – с использованием базовой климатической матрицы. С помощью регрессионного анализа построены пространственные модели для трех типов леса на основе выявленной связи NDVI с климатом и рельефом. Наиболее тесная связь NDVI обнаружена со средней многолетней температурой июля  $T_{июл}$ . При этом 98% пространственной изменчивости  $T_{июл}$  в бассейне объяснялось изменениями высоты, северо-восточной компоненты экспозиции, освещенно-

сти склонов с юго-запада и горизонтальной кривизны (характеризующей отроги). Высота по значимости существенно превосходила все остальные предикторы. Модель успешно прошла проверку, показатель деградации  $Degr = 1,0\%$ . Отметим, что поскольку *Тиюл* зависит также от направления и освещенности склонов, она не вполне точно описывается одной высотой.

Три типа леса представляли более 11 000 точек наблюдения (площадок размером 500 м × 500 м каждая): основную площадь занимали широколиственные и хвойно-широколиственные леса, мелколиственных и смешанных было в 4,5 раза меньше по площади, хвойных (сосновых и темнохвойных) – в 9 раз меньше. Для изучения горных лесов участки местности с абсолютной высотой меньше 500 м исключались из рассмотрения.

Для широколиственных и хвойно-широколиственных лесов бассейна р. Кубани связь летнего NDVI с климатом и рельефом для базового периода выражалась уравнением  $NDVI_{широк} = -0.364 \cdot (Тиюл - Тиюл_{ср})^2 - 0.173 \cdot Z - 0.142 \cdot Тиюл + 0.957$ ;  
 $r_s = 0.72$ ,  $P < 10^{-6}$ ,

где  $Z$  – высота,  $r_s$  – непараметрический ранговый коэффициент корреляции Спирмана. Значения предикторов в (5) нормированы, поэтому об их относительном вкладе можно судить по абсолютной величине коэффициента при предикторе. Модель показывает, что связь  $NDVI_{широк}$  с *Тиюл* нелинейна (квадратична). Эта нелинейность существенна и видна непосредственно из сравнения NDVI с *Тиюл*, причем максимум NDVI достигается при  $Тиюл = 14,6^\circ\text{C}$  (рис. 3), хотя наибольшая встречаемость широколиственных и хвойно-широколиственных лесов наблюдается в диапазоне температур 17-19°C.

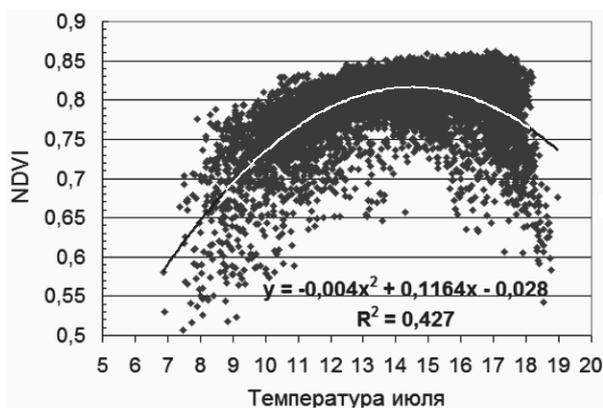


Рис. 3. Связь NDVI лета 2001 года со средней многолетней температурой июля для широколиственных и хвойно-широколиственных лесов бассейна р. Кубань.

Найденная связь  $NDVI_{широк}$  с *Тиюл* и рельефом позволяет рассчитать матрицы современных

и прогнозируемых значений NDVI по уравнению (5). Прогнозируемые значения рассчитываются при замене матрицы *Тиюл* и ее квадрата на базовый период на матрицу *Тиюл*, полученную из модели E GISS на 2050 год (рис. 4). Отметим, что к 2050 г. по этому климатическому сценарию диапазон оптимальных температур для широколиственных лесов окажется на верхней границе ареала их современного распространения, а оптимум квадрата температуры – за его пределами. Сравнение карт на рис. 4 показывает, что в современной области распространения широколиственных лесов ожидается уменьшение NDVI. Среднее значение NDVI рассчитанной для базового периода матрицы широколиственных лесов составляет 0,716, а для прогнозного срока 0,683.

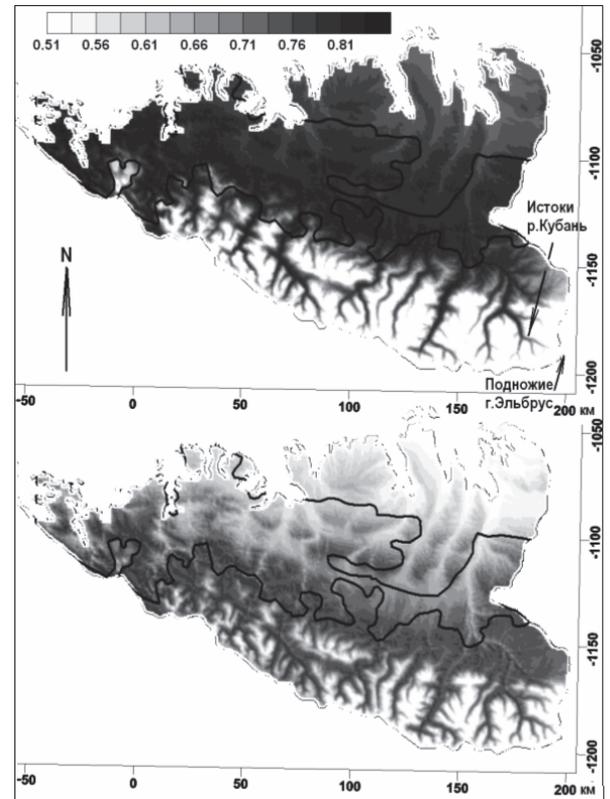


Рис. 4. Карты NDVI широколиственных лесов для базового периода (вверху) и для 2050 г. по модели E GISS (внизу), рассчитанные по модели (5). Темная линия – граница современного ареала широколиственных лесов.

Несмотря на повышение средней температуры на  $2,6^\circ\text{C}$  на территории бассейна р. Кубань для этих лесов, модель (5) дает снижение их фотосинтетической активности на 4,7% к 2050 году. Это может быть объяснено 1) нелинейным характером связи с температурой июля, и/или 2) сложными для освоения лесами условиями высокогорного рельефа, куда смещается температурный оптимум для NDVI. Первая причина вызывает более жесткую «привязку» или более сильную связь NDVI лесов с относительно узким диапазоном темпера-

тур. Смещение температурного оптимума за 50 лет на 440 м вверх по склону (см. таблицу) «перемещает» леса вверх по склонам, где значительно возрастает их крутизна, появляются сильно взранные долины и резко выраженные формы рельефа (вторая причина). Приведенные здесь доводы об изменении характера рельефа не предположены, а найдены с помощью анализа статистических свойств матриц рельефа. Таким образом, используемая нами модель дает не вполне очевидный результат: несмотря на потепление в горах, прогнозируется снижение фотосинтетической активности основного типа леса – широколиственных и хвойно-широколиственных лесов.

Регрессионные модели для NDVI мелколиственных (NDVI<sub>МЕЛК</sub>) и сосновых (NDVI<sub>СОСН</sub>) лесов приведены ниже

$$NDVI_{МЕЛК} = -0.191 \cdot Z - 0.184 \cdot (Тиюл - Тиюл_{СР})^2 + 0.141 \cdot kmin + 0.766; \quad r_s = 0.84, \quad P < 10^{-6}; \quad (6)$$

$$NDVI_{СОСН} = -0.263 \cdot (Тиюл - Тиюл_{СР})^2 + 0.171 \cdot kv - 0.054 \cdot GA + 0.695; \quad r_s = 0.70, \quad P < 10^{-6}, \quad (7)$$

где *kmin* есть минимальная кривизна, описывающая выраженность килевых форм, *kv* – вертикальная кривизна, характеризующая выпуклость и вогнутость профиля склонов, *GA* – крутизна склонов. Модели (6) и (7) также выявляют квадратичную связь NDVI мелколиственных и сосновых лесов с *Тиюл*. Однако главным фактором в пространственном распределении NDVI<sub>МЕЛК</sub> является высота *Z*, т.е. на линейный характер снижения NDVI<sub>МЕЛК</sub> с высотой накладывается нелинейная зависимость от температуры. Возможно, что этот тип леса, являясь по природе вторичным и произрастающий в основном на месте пожаров (и вырубок), имеет несколько меньшую согласованность с местными климатическими условиями. Существенна для мелколиственных лесов также связь с *kmin*, положительный знак которой указывает на то, что этот тип леса имеет тенденцию произрастать вне килевых форм (которым отвечают отрицательные *kmin*), вне доньев долин и оврагов. Уравнение (7) показывает, что значения NDVI<sub>СОСН</sub> имеют тенденцию к возрастанию вне вогнутых в профиле склонов (+*kv*) и на относительно пологих склонах (-*GA*).

При смещении вверх температурных оптимумов к 2050 году по сценарию E GISS на 570 м и на 600 м для мелколиственных и сосновых, соответственно (таблица), прогнозируемое среднее значение NDVI<sub>МЕЛК</sub> снизится на 5,8%, NDVI<sub>СОСН</sub> – на 3,2%. Определенные аспекты различия свойств лесных экосистем в базовый и прогнозный сроки лучше видны из графиков NDVI как функции высоты (рис. 5). На рисунке видно, что для всех типов леса прогнозируется смещение областей наибольших значений NDVI вверх по склонам вслед за перемещением температурных оптимумов. Однако, на больших высотах в горах

рельеф Кавказа становится более контрастным и менее пригодным для освоения лесами.

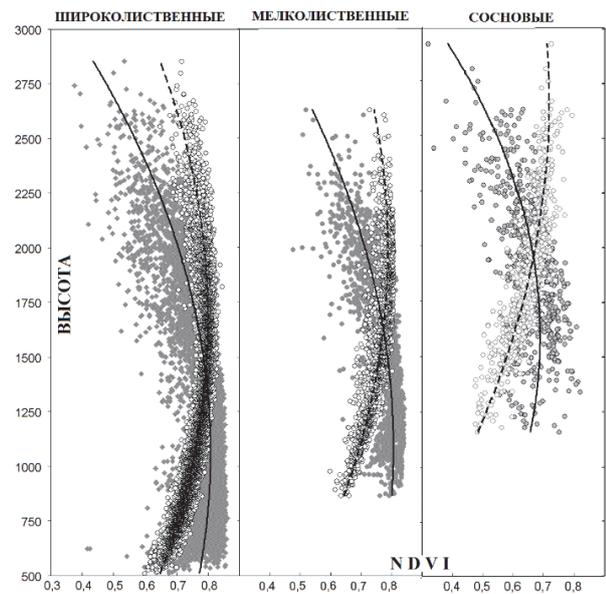


Рис. 5. Связь NDVI различных типов леса с высотой в бассейне р. Кубань для современного состояния и прогнозируемая к 2050 г. Параболы трендов зависимости NDVI от высоты отвечают нелинейности связей (сплошные линии – современное состояние, пунктирные – прогнозные)

Таблица. Средние по региону температуры июля *T<sub>СР</sub>* и высоты *Z<sub>СР</sub>* различных типов леса для базового и прогнозного (на 2050 год) сроков в бассейне р. Кубань.

	Типы леса		
	Широколиственные	Мелколиственные	Сосновые
<i>T<sub>СР</sub></i> , баз.	14,2°C	11,9°C	10,0°C
<i>T<sub>СР</sub></i> , 2050	16,8°C	15,2°C	13,4°C
<i>dT</i>	2,6°C	3,3°C	3,4°C
<i>Z<sub>СР</sub></i> , баз.	1160 м	1580 м	1900 м
<i>Z<sub>СР</sub></i> , 2050	1600 м	2150 м	2500 м
<i>dZ</i> , м	440	570	600

Взаимодействие между меняющимся во времени климатом и не меняющимся рельефом остается пока неосознанным в литературе. Линейность связи характеристик горных лесов с температурой продолжала доминировать в зарубежных моделях [33], а учет нелинейности стал проводиться лишь в недавнее время [24], но принятая ранее общая схема линейного отклика растительности на изменения климата пока не претерпела существенных изменений. Рост температуры по тому или иному климатическому сценарию мог бы вызывать увеличение среднего значения NDVI горных лесов в прогнозе на территорию бассейна р. Кубань, однако лишь если не учитывать рельеф. В этом заключается одно из важных проявлений двойственной природы меняющихся и не меняющихся со временем факторов среды, обнару-

живаемое лишь в моделях, где учет климата и рельефа производится одновременно. При этом существенную роль играет нелинейность.

В отличие от описанных трех типов леса, связь NDVI темнохвойных лесов с температурой июля не содержала значимых нелинейных по Тиюл членов. Причиной этого явилось, по-видимому то, что темнохвойные леса расположены довольно узкой полосой вдоль главного хребта Кавказа, занимая сравнительно небольшой диапазон высот, а значит и меньший, чем для других лесов, диапазон Тиюл. При этом для них отсутствовал максимум параболического тренда, как на рис. 3. Заметим также, что анализ встречаемости лесов на разных формах рельефа показал, что встречаемость темнохвойных лесов на резко выраженных и малопригодных для роста деревьев формах рельефа выше, чем для других типов леса. Таким образом, описанные выше эффекты нелинейности и двойственного проявления инвариантных и зависящих от времени факторов среды в используемых нами моделях могут проявляться не для всех типов леса.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Развиваемые нами методы прогнозного крупномасштабного картографирования используют 1) детальные данные полевых исследований (в точках наблюдения), 2) рассчитанные на их основе показатели состояния экосистемы для базового периода (там же), 3) полученные с помощью прогнозных аналитических моделей данные о климатогенных изменениях этих показателей (там же), 4) подробные данные о характеристиках рельефа (в элементах матрицы). Статистический анализ связей между структурными, функциональными характеристиками и абиотическими факторами и рельефом позволяет выявлять тесные значимые связи, на основе которых проводится интерполяция и экстраполяция изучаемых свойств. В результате формируются верифицированные пространственные модели для свойств экосистемы на базовый период, в виде матриц. Эти модели, в свою очередь, служат основой для формирования пространственно-временных моделей, также в виде матриц. Последние визуализируются в ГИС-программах по специально подобранным легендам для получения изображений – карт; в каждом элементе матрицы содержится значение прогнозируемой характеристики экосистемы.

Нами показано, что основой для дифференциации лесной экосистемы являются типы местоположений, и поскольку последние для изучаемых территорий не изменятся в ближайшие 50-100 лет, они могут быть использованы для расчета прогнозных карт показателей биологического круговорота. Предложено также в прогнозном картографировании использовать верифицированные модели гидротермических показателей

для базового периода, так как их пространственная вариабельность, узор сохраняются при климатических сдвигах, меняясь лишь примерно на рассчитанную константу. Возможность включения верифицированных моделей компонентов углеродного запаса в экосистемах, показателей ее устойчивости для базового периода в качестве предикторов прогнозируемых во времени изменений также обоснована в нашем подходе. Следовательно, рассчитываемые пространственно-временные модели могут рассматриваться как частично верифицированные.

Заметим, однако, что получаемые этими способами прогнозные карты носят характер предпосылок (потенциала) изменения лесных экосистем. Это связано с отсутствием во многих моделях, как пока и в наших, учета задержки по времени между изменением климата и изменением лесной экосистемы, «экологической инерции». Многолетние экспериментальные исследования показывают, что в горных условиях такая задержка для лиственных и бореальных лесов в США может составлять порядка 30 лет [20], однако в равнинных условиях бореальных лесов она может быть существенно больше, хотя пока и не вполне ясна [26]. В настоящее время появляется все больше публикаций, посвященных результатам многолетних наблюдений, в том числе с применением спутниковых данных, и есть надежда, что эти результаты могут быть включены в учитывающие экологическую инерцию прогнозные модели, как это сделано в работе [32] для изучавшихся в [20] горных лесов в США.

Отметим также, что применение нового пула абиотических факторов – расширенного набора морфометрических величин рельефа – в статистическом анализе позволило получить не только высокие показатели надежности моделей, но и выявить модифицирующую роль рельефа, выражающуюся в усилении или торможении климатогенных сдвигов в лесных экосистемах.

На примере расчета прогнозных среднemasштабных карт для горных лесов Северного Кавказа в отсутствие подробных данных о структуре и функционировании экосистем, а также гидротермических характеристик показано применение другой модели. Выявленные связи вегетационного индекса с климатом и рельефом для базового срока применены для прогноза во времени при использовании матриц будущего климата. В этих исследованиях выявлена также тормозящая роль рельефа, существенно преобразующая один из важнейших конечных результатов – прогнозную карту.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-05-00575-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль. 1975. 287с.
2. Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Потапов П.В., Турубанова С.А., Ярошенко А.Ю. Карта лесов Российской Федерации, окрашенная по преобладающим группам пород деревьев и сомкнутости древесного полога. Масштаб 1 : 14 000 000. Москва: Институт космических исследований РАН, 2004. Электронная версия карты доступна на сайте <http://terrante.iki.rssi.ru/>.
3. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
4. Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Ценкова Н.Л., Сурова Н.А. Высокогорная экология в моделях. М.: Наука, 2010. 487 с.
5. Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб.: Изд-во С-Петербур. ун-та, 2001. 328 с.
6. Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
7. Коломыц Э.Г. Борейный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
8. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 430 с.
9. Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. Устойчивость лесных экосистем, методы ее исчисления и картографирования // Известия Самарского научного центра РАН, 2013 (этот выпуск).
10. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 233 с.
11. Неуструев С.С. (1930). Элементы географии почв // Генезис и география почв. - М.: Наука, 1977. С.149-314.
12. Польшов Б.Б. Кора выветривания. Часть I. Процессы выветривания. Основные фазы и формы коры выветривания и их распределение. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 243 с.
13. Сочава В.Б. Учение о геосистемах. Новосибирск, Наука. 1975. 40 с.
14. Федяев А.Л., Майорова Е.В. Влияние микроклиматических, эдафических факторов на состояние сосняков кустарничково-сфагновых в условиях антропогенного воздействия // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления. Материалы Всеросс. науч. конф. с международ. участием (Петрозаводск 30.09-03.10.2009 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 197-200.
15. Цельникер Ю.Л. Газообмен CO<sub>2</sub> в лесных биогеоценозах // Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении. М.: Наука, 2006. С. 213-229.
16. Шарая Л.С., Шарый П.А. Связь абиотических и биотических характеристик лесной экосистемы Жигули // Известия Самарского научного центра РАН, 2009. Т.11. №1. С.22-30.
17. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агробиохимия, 2011. №2. С.57-81.
18. Щербаков Ю.А. Годовые приросты некоторых древесных пород на разноориентированных склонах // Сб.: «Влияние экспозиции на ландшафты». Пермь, Пермский университет, ученые записки, 1970. №240. С.159-163. – также Щербаков Ю.А. Из опыта изучения роли экспозиции в ландшафтообразовании // Сб.: «Влияние экспозиции на ландшафты». Пермь, Пермский университет, ученые записки, 1970. №240. С.3-99.
19. Allen D.M. The relationship between variable selection and data augmentation and a method for prediction // *Technometrics*, 1974. V.16. P.125-127.
20. Beckage B., Osborne B., Pucko C., Gavin D.G., Siccama T., Perkins T. A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont // *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 2008. V.105. N.11. P.4197-4202.
21. Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution // *Plant Ecology*, 1999. V.143. N.1. P.107-122.
22. Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // *Ecological Modelling*, 2000. V.135. N.2-3. P.147-186.
23. Huete A., Justice C., van Leeuwen W. MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Version 3. Univ. of Arizona and Virginia, April 1999. 120 p.
24. Hwang T., Song C., Vose J.M., Band L.E. Topography-mediated controls on local vegetation phenology estimated from MODIS vegetation index // *Landscape Ecology*, 2011. V.26. P.541-556.
25. Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H. Vegetation responses to climate change in the Alps – Modeling studies // Cebon P., Dahinden U., Davies H., Imboden D., Jaeger C. (eds.) *A View from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change*. Boston: MIT Press, 1998. Chapter 6. P.309-350.
26. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorensen T.D., Macdonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecological Monographs*, 2009. V.79. N.4. P.523-555.
27. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
28. Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A. The impact of new physical parameterizations in Hadley Centre climate model – HadCM3 // *Climate Dynamics*. 2000. V.16. P.123-146.
29. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.
30. Schmidt G.A., Ruedy R., Hansen J.E., Aleinov I., Bell N., Bauer M., Bauer S., Cairns B., Canuto V., Cheng Y., Del Genio A., Faluvegi G., Friend A.D., Hall T.M., Hu Y., Kelley M., Kiang N.Y., Koch D., Lacis A.A., Lerner J., Lo K.K., Miller R.L., Nazarenko L., Oinas V., Perlwitz J.P., Perlwitz Ju., Rind D., Romanou A., Russell G.L., Sato Mki., Shindell D.T., Stone P.H., Sun S., Tausnev N., Thresher D., Yao M.-S. Present day atmospheric simulations using GISS Model E: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data // *Journal of Climate*, 2006. V.19. P.153-192.
31. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*, 2002. V.107. N.1-2. P.1-32.
32. Tang G., Beckage B., Smith B. The potential transient dynamics of forests in New England under historical and projected future climate change // *Climate Change*, 2012. V.114. N.2. P.357-377.
33. Theurillat J.-P., Felber F., Geissler P., Gobat J.-M., Fierz M., Fischlin A., Küpfer P., Schlüssel A., Velutti C., Zhao G.-F. Sensitivity of plant and soils ecosystems of the Alps to climate change // Cebon P., Dahinden U., Davies H.C., Imboden D., Jaeger C.C. (Eds.) *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change* - Cambridge, MA: MIT Press, 1998. P.225-308.

34. Troll C. Landscape ecology (geoecology) and biogeocenology – a terminology study // Geoforum, 1971. V.8/71. P.43-46.

**PROGNOSTIC MAPPING OF FOREST ECOSYSTEMS  
(A LANDSCAPE-ECOLOGICAL APPROACH)**

© 2013 L.S. Sharaya

Institute of Volga-River Basin Ecology of the Russian Academy of Sciences, Togliatti

Methods of fine- and intermediate-scale mapping of the prognostic state of forest ecosystems under global climate changes are considered. Projected maps of functional and structural changes in forest stands are expressed as calculated grids visualized in GIS programs. Our methods of calculating projected maps differ from other methods of data extrapolation and interpolation by the way how to use as predictors the grids of: 1 – catenae, 2 – values of the property under consideration for the base period, 3 – prognostic values of hydrothermal terrain features, 4 – stability indices of ecosystems. It is shown that the topography may modify projected forest patterns calculated using climate changes only. The approaches are illustrated using examples of prognostic models for forest ecosystems of Oksko-Terrasny Reserve and Northern Caucasus.

Key words: spatial modeling, biogeocenosis, geomorphometry, types of locations, multiple regression, verification.