

Сценарий «глобального потепления климата» и прогноз первичной биологической продуктивности на территории Волжского бассейна (Россия)

Розенберг Г.С., Костина Н.В., Кузнецова Р.С., Саксонов С.В.

Институт экологии Волжского бассейна РАН, Самарская область, г.
Тольятти

Аннотация

На примере крупного региона (Волжский бассейн) осуществлен прогноз изменения первичной биологической продуктивности в условиях глобального потепления климата с использованием экспертной информационной системы REGION. Рассмотрены варианты влияния на биопродуктивность антропогенного загрязнения (выбросы в атмосферу) и уровня экономического развития субъектов региона.

Ключевые слова: Волжский бассейн, потепление климата, биологическая продуктивность, экспертная система.

Введение

Среди актуальных проблем в области экологии все более отчетливо вырисовывается задача исследования последствий глобальных изменений природной среды, связанных с воздействием человека на климатическую систему Земли. Предполагается, что предстоящие глобальные изменения климата будут связаны в первую очередь с техногенным ростом содержания CO₂ и других парниковых газов в атмосфере, что может нарушить естественный углеродный цикл в биосфере и привести к целому ряду отрицательных последствий.

Увеличение парниковых газов в атмосфере имело место и в прошлые эпохи, но это никогда не происходило столь быстро. Если в прошлом климат и биосфера Земли в силу постепенности изменений состава атмосферы успевали перейти в новое устойчивое состояние и находились в квазиравновесии, то в современный период при интенсивном, чрезвычайно быстром изменении газового состава атмосферы биосистемы выходят из стационарного состояния. Последствия такого «выхода из квазистационара» могут быть самыми серьезными [1].

В научной литературе уже описаны основные глобальные (и отчасти региональные) прогнозные характеристики предстоящих и уже начавшихся антропогенных гидроклиматических изменений: температурных условий и атмосферного увлажнения, испарения, речного стока и других параметров [2-4], а также структурно-функциональных сдвигов в растительном покрове и природных экосистемах в целом [5, 6]. Однако эти прогнозные разработки носят весьма схематичный характер и нацелены главным образом на оценку общего будущего состояния биосферы как планетарной системы.

Изменения климата Земли происходили во все эпохи. Эти изменения были обусловлены самыми разными причинами, в том числе и внеземными. Однако природные процессы, происходящие в результате этих изменений, везде протекают различно, и это определяет региональное многообразие биосферы.

Поэтому, очевидно, что возможные негативные последствия глобальных изменений климата должны рассматриваться на региональном уровне.

Методы регионального, а тем более локального прогнозирования остаются еще слабо разработанными, что связано как с недостатком фактического материала, так и с принципиальными методическими трудностями. Прежде всего, остается неясной сама реакция экологических (климатических) ниш почвенно-фитоценотического ядра региональных и локальных экосистем на перестройку фоновых атмосферных процессов. Основные исследования, очевидно, должны быть направлены на поиск равновесных процессов, которые обеспечивают устойчивость природных экосистем в меняющихся условиях [7-10].

Прогнозируемые изменения климата, неизбежно должны оказать существенное влияние на природные экосистемы, смещение природных зон. Для прогноза подобных изменений используются различные методики [8, 11] и палеоаналоговые сценарии будущего климата [9].

Исследования показывают, что для равнинных территорий размещение природных зон соответствует определенным интервалам значений испаряемости и индекса сухости. При изменении значений индекса сухости в пределах от 0,3 до 1,0, который соответствует тундре и лесотундре, зоне хвойных, смешанных и широколиственных лесов, распределение природных зон зависит главным образом от температурного режима и как следствие этого – от испаряемости. При более высоких значениях отношения испаряемости к осадкам, соответствующим лесостепи, степи, полупустыне и пустыне, локализация природных зон определяется главным образом условиями увлажнения.

Исследования на основании палеоботанических и палеоклиматических данных, показали, что возможные изменения состояния экосистем и природных зон, обусловленные изменениями климата, могут быть достаточно велики. Предполагается, что уже при повышении среднепланетарной температуры на 1-2°C может почти полностью исчезнуть арктическая континентальная тундра в Европе и сильно сдвинуться на север ее южная граница в Азии. Северная граница таежных лесов также значительно сместится к побережью Северного Ледовитого океана, а южная их граница при глобальном потеплении на 1,0°C будет проходить по 60-65°с.ш. При увеличении же глобальной температуры на 2,2°C в некоторых районах южная граница таежных лесов может достичь 67°с.ш. [12].

Южные ареалы современных хвойных лесов при глобальном потеплении будут заняты смешанными лесами, которые при повышении температуры на 2,2 °C продвинулись на север почти на 10 градусов. Лесостепи при этом также заметно продвинулись как на север, так и на запад и восток. Степи на востоке займут территории современных хвойных лесов, а на юге – частично пустынь и полупустынь.

В соответствии с прогнозом, наиболее заметно сократятся площади тундры и лесотундры. Так, если в настоящее время тундра и лесотундра занимают примерно 19,5% территории, то при потеплении на 2,2°C эти зоны будут занимать всего 3% его площади. Что касается хвойных лесов – их площади также могут сократиться с 38,7% до 11,3%. Ареал широколиственных лесов при этом, напротив, расширится с 1,1% до 14,5%. Площади лесостепей увеличатся в 2,3 раза, а степей – в 1,8 раза. Важно отметить, что для глобального потепления на 2,2°C характерно некоторое остепнение территории, а именно, уменьшение общей площади лесов на 5,6%. Тенденции же к опустыниванию при изменениях температуры и осадков согласно палеоаналоговым сценариям проявиться не должно [12].

Существуют и другие построения [6, 13, 14], которые в большинстве своем прогнозируют наибольшие изменения в северных регионах. Так, по мнению одних, при удвоении концентрации CO₂ в атмосфере площадь тундры может сократиться на 32%, бореальных лесов – на 37%. Другие наоборот считают, что такие условия будут благоприятны для распространения лесов. По некоторым моделям, которые учитывают изменение режима осадков, прогнозируют изменения растительности на 60% территории суши. Согласно этим оценкам, площади тундры, хвойных лесов и редколесий, аридных областей и пустынь должны значительно сократиться.

Обобщая результаты, полученные по различным моделям, можно сказать, что за исключением некоторых противоречий, общие тенденции в изменении естественной растительности при глобальном потеплении климата очевидны. Так, все авторы делают заключение о сокращении зоны тундры и бореальных лесов, увеличении остепненности, возможном уменьшении площади аридных территорий.

1. Роль лесных экосистем в биосферных процессах

Рассматриваемая в данной работе территория Волжского бассейна, в большей своей части расположена в лесной зоне. Проблема сохранения лесных экосистем и воспроизводства лесных ресурсов для Европейской России всегда имела и имеет большое значение, поскольку здесь исторически сложился главный индустриальный центр страны. В настоящее время в решении этой проблемы все большее значение приобретают вопросы устойчивости природных экосистем как естественноисторической основы устойчивого развития региона [7].

В условиях меняющегося климата, у южной границы бореального пояса, где лесные сообщества находятся в состояниях близких к критическим эта проблема особенно актуальна. Стабилизация континентальной биосферы, которая определяет экологическую безопасность крупных территорий, существенно зависит от состояния локализованных зонально-региональных типов экосистем, и в первую очередь двух конкурирующих растительных формаций – лесной и травянистой [15, 16].

Леса являются важнейшими производителями биологической продуктивности естественных экосистем. Занимая 1/3 поверхности суши, они синтезируют почти 2/3 ее органической массы и около половины всей органической массы Земли. Леса имеют огромное значение как возобновляемый источник энергетических ресурсов, представляя собой самый распространенный, наиболее высокоорганизованный и значимый для биосферы тип экосистем.

Вместе с тем леса являются важнейшим регулятором крупномасштабных природных процессов, оказывающих глобальное воздействие на состояние биосферы, во многом определяющей ее качество и состояние. Лесам принадлежит ведущее место в стабилизации природной среды. Они обладают максимальной биологической продуктивностью, оказывают огромное воздействие на газовый, гидрологический и тепловой режимы и поддерживают естественное состояние микроклимата и климата в целом. Состояние лесов во многом определяет экологическую обстановку как по всей планете, так и в ее отдельных регионах.

Леса оказывают существенное влияние на углеродный бюджет атмосферы. На территории лесного фонда накоплены сотни миллиардов тонн фитомассы и мертвых органических материалов, содержание углерода в которых достигает половины их общего веса. Запасы углерода в фитомассе лесной растительности оцениваются в пределах от 33 до 35 млрд. т [17].

Прогнозирование глобального потепления в первую очередь скажется на природной ситуации в высоких и средних широтах, а значит, и на лесной растительности. Естественно, что исследования, касающиеся поглощения растениями атмосферного CO₂, продолжительности удержания углерода в экосистемах, математического моделирования его основных потоков в макросистеме «атмосфера – лесная растительность – почва», весьма существенны для установления роли суши и океана в стабилизации биосферных процессов [6].

Роли круговорота углерода в биосферных процессах в последнее время уделяется большое внимание [6, 18, 19 и др.]. Основное внимание в этих работах уделяется методам определения углерода в растительности и почве и созданию баз данных по его содержанию в лесных, болотных и других экосистемах. Почти нет работ, посвященных прогнозу климатогенной динамики параметров, осуществляющих биотическую регуляцию содержания углекислого газа в атмосфере [20]. В последние годы решению этой задачи в рамках концепции биотической регуляции углеродного цикла в биосфере посвящены работы Э.Г. Коломыца [7-9].

2. Особенности распределения продуктивности наземных экосистем

Первичная биологическая продуктивность представляет собой фундаментальное свойство биосферы, обеспечивает ее энергетические ресурсы и является важнейшим параметром функционирования экосистем, в основе которого лежит малый биологический круговорот. Она относится к показателям устойчивости среды, поскольку отражает способность экосистемы в минимальные сроки восстановить себя в случае антропогенных нарушений.

Наибольшей продуктивностью отличается травянистая и травяно-древесная растительность в условиях достаточного увлажнения и на плодородных почвах пойм и приозерных впадин, в тропиках и субтропиках. Продуктивность лесов выше, чем травянистой растительности, расположенной вне пойм, она снижается при переходе от тропических лесов к лесам умеренной, а затем бореальной зоны.

Продуктивность и общий запас растительной биомассы определяются в первую очередь обеспечением теплом и влагой. Уровень увлажнения существенно сказывается на продуктивности в степной и лесостепной зонах. Повышение увлажнения в зонах, достаточно обеспеченных теплом, приводит к значительному увеличению продуктивности. Обратное происходит при недостатке тепла. Так, в условиях средней и северной тайги связанная с высоким уровнем увлажнения заболоченность ведет к снижению уровня продуктивности лесов.

Разнообразие растительных сообществ определяется геологической, геоморфологической и климатической неоднородностью. Роль отдельных факторов в распространении растительных сообществ неоднозначна. Наиболее тесно связан с продуктивностью экосистем климат, который является определяющим в распространении ареалов тех или растительных сообществ. Подстилающие породы, рельеф местности и особенности почвенного покрова определяют локальные особенности протекания продукционных процессов [21].

Значительная широтная и долготная протяженность России вызывает существенное разнообразие природных условий. Годичная биопродуктивность изменяется на ее территории в очень широких пределах. Наиболее высокая биопродуктивность наблюдается в травянистых болотах в пределах сухих степей Европейской части России и на южнотаежных лугах Дальнего Востока и достигает до 40 т/га в год; в луговых и настоящих степях и лугах степной зоны она иногда составляет 20 т/га в год. Леса занимают среднюю позицию, например,

продуктивность ельников меняется в пределах 4,6-13,1 т/га в год, а сосняков 2-10 т/га в год. Весьма низкая продуктивность в тундрах, составляет 1,5-5,4 т/га в год, а минимальная – в арктических пустынях, всего 1 т/га в год. Отсюда видно, что продуктивность тесно связана с температурным режимом.

В переувлажненных болотистых интразональных сообществах с севера на юг продуктивность увеличивается. В полярном и бореальном поясах она меньше или сопоставима с показателями зональных сообществ, а южнее возрастает и значительно превышает зональные.

Значительно меняется продуктивность в пределах лесной зоны в целом. Она уменьшается с запада на восток. В лесотундре и лесостепи меридиональные различия практически отсутствуют.

Пространственные изменения наблюдаются также и в пределах одного типа растительности, поскольку разные растительные сообщества по-разному реагируют на изменения температуры и влагообеспеченности. Например, в еловых и сосновых лесах при изменении среднегодовой температуры на 1°C продуктивность меняется незначительно, а в лиственных и темнохвойных полидоминантных лесах – почти в 10 раз. Ельники же наиболее сильно реагируют на изменения годовых сумм осадков [21].

Анализ материалов позволяет наметить важнейшие гидротермические рубежи, определяющие совокупность характеристик биологической продуктивности. На Европейской территории России основной такой рубеж прослеживается по границе зоны широколиственных лесов [21]. Отмеченный рубеж примерно соответствует рубежу, который характеризуется значением радиационного баланса 145 кДж/см²/год [22] и индексом сухости около 1 [23].

К северу от этого рубежа лежит совокупность гидротермических областей достаточного увлажнения, но недостаточной теплообеспеченности. Ей соответствует гумидная область бореального пояса.

К югу от этого рубежа расположены три совокупности областей достаточной теплообеспеченности, но различной степени увлажнения. Первая совокупность – области достаточной теплообеспеченности и достаточного увлажнения. Ей соответствуют гумидные и семигумидные области суббореального пояса (широколиственные суббореальные леса, луговые суббореальные степи). Вторая совокупность объединяет области достаточной теплообеспеченности, но недостаточного увлажнения. Ей соответствуют семиаридные области суббореального пояса (настоящие и сухие суббореальные степи). Третья совокупность – области избыточной теплообеспеченности и недостаточного увлажнения. Ей соответствуют аридные области суббореального пояса (полупустыни и пустыни).

3. Характеристика наземных биоценозов Волжского бассейна

В соответствии со схемой деления суши Земли на термические пояса и биоклиматические области [21], в пределах Волжского бассейна выделены бореальный и суббореальный термические пояса. Леса приурочены к бореальному поясу, гумидным и семигумидным биоклиматическим областям суббореального пояса.

Обширные пространства северных пределов Волжского бассейна занимает формация еловых лесов. Здесь располагается зона средней тайги. В западной ее части господствует ель европейская, в восточной – ель сибирская. Еловые леса широко распространены и за пределами таежной зоны, проникая на юг в

широколиственно-хвойную зону. Здесь в основном господствуют травяные ельники, иногда кустарничково-травяные [13]. Следует отметить, что максимальная продуктивность еловых лесов отмечается именно на южной границе области их распространения. Это полностью определяется потенциальными возможностями данной породы и природными условиями, прежде всего богатством почв, к которому ель особенно чувствительна, а также низким уровнем заболоченности, так как ель избегает глеевых почв.

Широколиственно-хвойные леса широкой полосой, постепенно сужающейся с запада на восток к Уралу, протягиваются от западных границ Волжского бассейна, охватывая Смоленско-Московскую возвышенность и Вятско-Камский бассейн на востоке. В состав пород ширококолиственно-хвойных лесов входит дуб черешчатый, часто липа сердцелистная и другие широколиственные породы. Широколиственно-хвойные леса не протягиваются сплошной полосой, они характеризуются вкраплениями в эту же зону еловых, сосновых, мелкоколиственно-хвойных и мелкоколиственных лесов. Продуктивность дубово-липово-еловых травяных лесов западной части бассейна зоны ширококолиственно-хвойных лесов [24] достаточно высокая.

Зона широколиственных лесов в пределах Волжского бассейна протягивается все более суживающейся полосой с запада к востоку. Слагается она преимущественно дубравами травяными из дуба черешчатого, отчасти липняками из липы сердцелистной. Липняки тяготеют в основном к востоку.

Однако широколиственные леса встречаются и за пределами зоны широколиственных лесов. Крупные их массивы нередки в зоне ширококолиственно-хвойных лесов, в зоне лесостепи. Отдельные их массивы заходят в зону настоящих степей. В связи с этим показатели продуктивности широколиственных лесов варьируют довольно широко. Тем не менее, прослеживается общая тенденция к увеличению годовой продуктивности от зоны ширококолиственно-хвойных лесов к зоне широколиственных и некоторое снижение показателя в зоне лесостепи и особенно в зоне степи [21]. Значительно более продуктивны широколиственные леса в пределах собственно зоны широколиственных лесов.

Наиболее велика продуктивность в лесах в возрасте 70-80 лет. Она заметно падает в перестойных дубравах [16, 25], где опад и отпад превышает продукцию, что свидетельствует о разрушении этих дубрав.

Продуктивность широколиственных лесов в пределах степной зоны, где она формируется как в байраках, так и на междуречьях, по средним показателям еще более снижается по сравнению с широколиственными лесами собственно зоны широколиственных лесов [21].

Коренные и производные леса из сосны обыкновенной распространены чрезвычайно широко, от северных границ Волжского бассейна до зоны настоящих степей включительно. Большею частью они приурочены к пескам или выходам коренных пород. Продуктивность сосновых лесов в пределах одних и тех же зон довольно близка к продуктивности коренных еловых лесов и лиственничников.

Сосновые леса в зоне ширококолиственно-хвойных лесов занимают обширные задровые равнины. Продуктивность здесь [24], как кустарничково-зеленомошных, так и травяных или со значительным участием трав, сравнительно невысока.

В зоне широколиственных лесов сосновые леса также распространены довольно значительно. Общие показатели продуктивности сосняков всех типов здесь снижаются, что, по-видимому, связано с менее благоприятными условиями увлажнения.

Мелколиственные и мелколиственно-хвойные леса преимущественно из березы бородавчатой и осины распространены чрезвычайно широко от среднетаежной до степной зоны включительно. Большинство мелколиственных и мелколиственно-хвойных лесов является вторичными на месте вырубленных коренных лесов.

В зоне южной тайги березовые и елово-березовые леса распространены широко, поскольку коренные леса здесь подверглись особенно интенсивным рубкам. В бассейне верхней Волги наименьшая продуктивность в кустарничковых березняках. Во всех видах березняков продукция формируется в основном за счет зеленых ассимилирующих органов. Прослеживается связь величин продуктивности с возрастом лесов и выявляется, что максимальная продуктивность в кустарничковых и травяно-кустарничковых березняках присуща лесам в возрасте 50-60 лет, а в травных березняках – в возрасте 40 лет.

Наряду с березовыми, преимущественно вторичными лесами в южнотаежной зоне широко распространены осиновые леса. Осинники, преимущественно травные, более высокопроизводительны, нежели березняки. Осина является наиболее продуктивной вторичной породой ее продуктивность обычно выше продуктивности коренных лесов тех же местообитаний. Максимальные величины продуктивности прослеживаются в осинниках в возрасте 40-45 лет, что отмечалось и для березняков травных. Однако в отличие от них в продукции осинников ведущая роль принадлежит древесине, что ставит их в один ряд с широколиственными лесами.

Обобщая закономерности распределения показателей продуктивности различных типов лесов, распространенных в Волжском бассейне, можно сказать, что более высокая производительность коренных лесов всех встречающихся здесь зон. Характерно, что в пределах каждой провинции максимальные значения продуктивности бореальных формаций как коренных, так и производных лесов отмечены в зоне южной тайги. Они несколько снижаются в зоне широколиственно-хвойных лесов и заметно падают в лесостепной и степной зонах. Наиболее производительны суббореальные широколиственные леса в зоне широколиственных лесов. Продуктивность их падает в зонах лесостепи и степи [21].

Продуктивность производных сосняков всюду или равна или несколько ниже продуктивности коренных лесов. Продуктивность мелколиственных коренных и производных лесов, особенно производных березняков, значительно ниже продуктивности хвойных коренных лесов, а также сосняков. При этом производительность осинников обычно выше производительности березняков.

Можно отметить важную закономерность, что при увеличении продуктивности лесов таежной зоны при продвижении на юг в зонах широколиственно-хвойных и широколиственных лесов отмечается стабилизация показателя [21]. Это связано с перераспределением энергии хвойными и широколиственными древесными породами. У последних значительно больше траты на дыхание. Снижение же продуктивности лесов от зоны широколиственных лесов к зоне лесостепи обусловлено возрастанием дефицита влаги.

В пределах Волжского бассейна степная растительность представлена зоной луговых степей и зоной настоящих умеренно засушливых степей. Растительный покров степей однотипен и складывается представителями корневищных и дерновинных злаков, и степного мезоксерофильного и ксерофильного разнотравья [21].

Степи в настоящее время почти полностью распаханы, участки естественной степной растительности сохранились лишь на территориях заповедников, в балках и на опушках леса. Продуктивность луговых степей, которые в основном

распространены на юго-западе бассейна Волги формируется преимущественно подземными органами.

Зона умеренно засушливых степей на территории Волжского бассейна представлена в основном на юге Самарской области и частично на юго-востоке Башкирии. Продуктивность умеренно засушливых степей значительно меньше, чем в луговых степях, что обусловлено большей длительностью летней паузы.

Луга, как материковые, так и пойменные, в степной зоне занимают довольно значительные площади. Материковые луга формируются по лесным полянам и опушкам (лесостепь), на склонах степных логов, в предбалочных понижениях, по озерным котловинам. Они характеризуются высокими показателями продуктивности [26]. Следует отметить, что в зоне настоящих умеренно засушливых степей, встречаются те же типы лугов, как и зоне луговой степи. В левобережной части бассейна средней Волги общая продуктивность мезофитных лугов ниже, чем в зональных степях, и значимость зеленой части в них также больше [27]. Солонцовые луга зоны умеренно засушливых степей на луговых корковых солонцах характеризуются значительно более низкими показателями [27], чем аналогичные луга зоны луговых степей.

Степные ландшафты отличаются большой контрастностью показателей биологической продуктивности между зональными и интразональными формациями, нежели лесные ландшафты. Наиболее продуктивными являются луговые степи, а по мере продвижения на юг и засоления почв продуктивность их падает. В структуре продукции степных формаций доминируют подземные органы.

Высокий уровень продуктивности в травянистых экосистемах объясняется тем, что находясь в области максимального колебания гидротермических показателей по годам, они стремятся полностью использовать условия вегетационного периода года, давая каждый раз максимальную при данных температурах и увлажнении продуктивность. На север и на юг этот показатель быстро снижется, так как уже в сухих степях продуктивность лимитируется запасами воды или ее соленостью. Лесные же сукцессионно более зрелые и произрастающие в более стабильном климате Севера экосистемы, характеризуются формированием большего запаса фитомассы, а не максимальной продукции.

4. EIS REGION как инструмент прогнозирования

Разработанная в ИЭВБ РАН экспертная информационная система (ЭИС) REGION явилась одним из первых опытов комплексного анализа пространственно распределенной информации и объединяет в себе иерархию баз различного регионального уровня [20, 28, 29, 32 и др.].

Система предназначена для хранения баз данных, их анализа и визуализации результатов обработки. Она представляет собой комплекс объединенных в единое целое программ, позволяющих осуществлять в процессе интерактивной работы с пользователем различного рода задач с имеющимися в информационном обеспечении системы объектами информации.

Основной задачей системы является не только хранение информации по экологическим показателям, но и разработка сценариев экологической обстановки регионов при разных вариантах социально-экономического развития, прогноз изменения функционирования экосистем в условиях меняющегося климата, оценка экологического состояния территорий с использованием различных алгоритмов обработки информации. Для этого в составе программного обеспечения системы

сформирована развитая библиотека методов и алгоритмов исследования причинно-следственных связей между факторами эколого-экономической системы.

Система REGION и соответствующие ей базы пространственно распределенных экологических данных, формально может быть отнесена к GIS «неклассического типа». Основное ее отличие от GIS – это отказ от тщательной детализации чисто географических аспектов территории. Любой показатель (экономический, экологический, климатический и чисто географический) «привязывается» к некоторому участку квадратной или прямоугольной формы, имеющему зачастую достаточно большую площадь.

Большинство показателей, необходимых для оценки экологического состояния исследуемой территории, имеют административно-территориальную привязку, что связано с сегодняшним состоянием экологического мониторинга. Показатели, характеризующие природную среду, имеют, как правило, более детальную информационную привязку к территории и не зависят от административного деления. Усреднение таких показателей в пределах каждого участка приводит к потере информации об индивидуальных различиях отдельных территорий внутри участка. Однако это позволяет осуществлять выравнивание показателей для получения более надежных и сопоставимых результатов. Таким образом, пожертвовав географической эстетичностью, которая по отношению к пространственно распределенным данным вряд ли оправдана необходимостью, ЭИС REGION приобретает не менее привлекательные качества: дешевизна, экономичность в ресурсах, простота в освоении, эксплуатации и интерпретации выходных данных. Для построения прогнозов и оценки сценариев возможного развития территории в условиях антропогенного воздействия и моделирования связей используется методы множественного регрессионного анализа с исключением несущественных показателей.

База данных ЭИС REGION включает пространственно распределенную информацию по 24 областям и автономным республикам Волжского бассейна, которые «охватывают» более 80% всей его территории. Всего в Волжский бассейн попадает территория 41 административной единицы (две из них – в Казахстане).

При создании «пространственно-координатной» сетки для территории Волжского бассейна было выделено 210 участков единичной площадью 6,5 тыс. км². Под участком понимается элементарный, далее не дробящийся объект привязки пространственно-распределенной информации, т. е. принято, что каждый показатель в любой точке участка имеет одинаковое численное значение.

При построении регулярной сетки учитывались следующие обстоятельства:

- удобство координатной привязки, простота построения и охват всей территории;
- целостность восприятия полученных результатов;
- увеличение количества участков должно быть оправдано и обосновано целями исследования, имеющимися пространственно распределенными показателями, их уровнем пространственной распределенности.

Исходным материалом при построении регрессионной модели изменения первичной биологической продуктивности на территории Волжского бассейна, в зависимости от прогнозируемых изменений климата, послужили карты масштаба 1 : 6 000 000, представленные в атлас-монографии Э.Г. Коломыца [8].

Территория Волжского бассейна занимает обширную территорию – это 1360 тыс. км², что составляет 62% Европейской части России. Она простирается с севера на юг на 1910 км и на 1805 км (в верхней части) – с запада на восток [20]. Бассейн Волги включает большинство природных зон – от таежных лесов до полупустынь. Объектом внимания нашей работы является верхняя часть Волжского бассейна, где

представлены средние и южные таежные леса, смешанные и широколиственные леса средней полосы и лесостепь и северная степь.

Как указывалось выше, информация в базу данных ЭИС REGION вводилась по выделенным участкам. Для того чтобы получить информацию с представленных карт, прежде всего, принятая нами, пространственная сетка с 210 участками была адаптирована под их масштаб и проекцию. Привязка производилась по координатной сетке и корректировалась по гидрографической сети.

Поскольку в атлас-монографии рассматривается бореальный экотон Волжского бассейна, и некоторая часть территории осталась вне поля зрения автора, исследуемая территория включает 144 участка. За пределами оказались Калужская, Волгоградская, Астраханская области и частично Тверская, Пермская, Саратовская области и республика Башкортостан. В базу данных REGION были введены гидроклиматические параметры, такие как средние температуры января и июля, годовая суммарная радиация и суммы осадков холодного и теплого периодов, рассчитанные для базового периода (средние за XX век). Для всех участков рассчитывалось среднее значение показателя, который и был принят для каждой точки выделенного участка.

Волжский бассейн охватывает основную наиболее индустриально развитую часть Европейской территории страны, где очень высокий уровень антропогенной нагрузки на природные экосистемы. База данных ЭИС REGION содержит множество показателей по данным антропогенной составляющей, учет которой является отличительной чертой, построенной нами модели.

Для построения прогнозной модели изменения первичной биологической продуктивности в условиях меняющегося климата и усиления антропогенного воздействия на экосистемы использован алгоритм множественной корреляционной регрессии с исключением несущественных показателей [30], имеющийся в арсенале экспертной системы REGION.

Используя гидроклиматическую информацию базового периода, а также некоторые параметры антропогенного воздействия на территорию Волжского бассейна получено уравнение (модель), представленное в табл. 1

Таблица 1. Факторы, влияющие на изменение первичной биопродуктивности.

Наименование факторов, включенных в регрессионную модель	Коэффициенты регрессии	Уд. вес влияния
Свободный член	-2,1800	
Температура января, °С	0,1132	5,30
Температура июля, °С	0,2493	11,33
Сумма осадков за холодный период, мм	0,0148	19,71
Сумма осадков за теплый период, мм	0,0137	35,91
Годовая суммарная радиация, МДж/м ²	0,0001	1,15
Валовый региональный продукт в 2000 г., млн. руб./чел.	-0,0144	1,78
Суммарные выбросы в атмосферу загрязняющих веществ (среднее за 1995-2000 гг.), баллы	-0,0464	1,47
Коэффициент множественной корреляции		0,875
Накопленная сумма удельного влияния факторов, %		76,65

Полученные результаты свидетельствуют, что наибольший вклад (35,9%) в уровень биопродуктивности растительных формаций вносит сумма осадков за теплый период. Объяснить это можно тем, что в период активной вегетации водопотребление растений достигает максимальных значений, а в июле травянистые растения проходят фазы выхода в трубку, колошения (для злаков) и цветения, а у древостоев завершается формирование ранней древесины и закладывается поздняя древесина [31]. Высока доля влияния (19,7%) осадков за холодный период, так как от их количества зависит степень продукционной влаги в метровом слое почвы весной, когда начинается период активной вегетации. Важным фактором для первичной биопродуктивности является средняя температура июля (11,3%). Дело в том, что в процессе региональных прогнозно-экологических исследований [8, 10] эмпирически были установлены тесные связи июльских запасов продуктивной влаги в почве с показателем Высоцкого – Иванова. В свою очередь, этот показатель определяется почти исключительно средне июльской температурой.

В качестве параметров антропогенного воздействия в модель включены суммарные выбросы загрязняющих веществ, которые состоят из оксида углерода, оксида азота, диоксида серы и др. Для расчетов в модели рассматривается два варианта уровней загрязняющих веществ на 20% и 50% превышающих уровень среднего показателя за 1995-2000 гг.

Другой антропогенный фактор – валовой региональный продукт, который принят в 2 раза превышающим уровень 2000 г. Чем выше в регионе валовой продукт, тем выше уровень развития промышленности и сельского хозяйства в регионе и, следовательно, выше антропогенная нагрузка. Доля этих показателей хоть и невысока, однако же они имеют отрицательное влияние на биопродуктивность.

5. Обсуждение результатов

Полученная модель позволила построить прогноз изменения показателей первичной биопродуктивности в условиях меняющегося климата (как это сделано и в работе Э.Г. Коломыца [8]) на 2010, 2030, 2050 гг. (рис. 1). По полученным результатам видно, что в сравнении с базовым периодом уровень первичной биопродуктивности по всей территории Волжского бассейна увеличивается. Так в 2010 г. при увеличении средней температуры июля на 1°C и среднегодовых осадков на 60 мм, средние значения продуктивности по всей территории Волжского бассейна увеличатся на 1,2 т/га год. В 2030 г. при увеличении средних значений температуры по бассейну на 2°C и осадков на 110 мм продуктивность увеличится на 2,4 т/га год. А в 2050 г. при увеличении средней температуры июля на 2,8°C и среднегодовых осадков на 170 мм уровень средних значений биопродуктивности по сравнению с базовым периодом может увеличиться на 3,4 т/га год.

Если проанализировать изменение уровня продуктивности по природным зонам в пределах Волжского бассейна, то в 2010 г. по всем зонам произойдет равномерное увеличение показателя, только в зоне широколиственных лесов чуть больше и в лесостепи чуть меньше чем 1,2 т/га в год (рис. 2). Это при том, что температура июля для зоны лесостепи и северной степи повысится на 0,2°C (рис. 3), чем по всей территории бассейна, а уровень среднегодовых осадков здесь ожидается меньше, чем в других зонах. В лесостепи уровень годовых осадков поднимется менее чем на 50 мм в год (рис. 4), а в зоне степи на 55 мм в год. В зоне степи уровень летних осадков будет выше, чем в лесостепи почти на 10 мм и зима помягче, очевидно, поэтому и продуктивность повыше, чем в лесостепи.

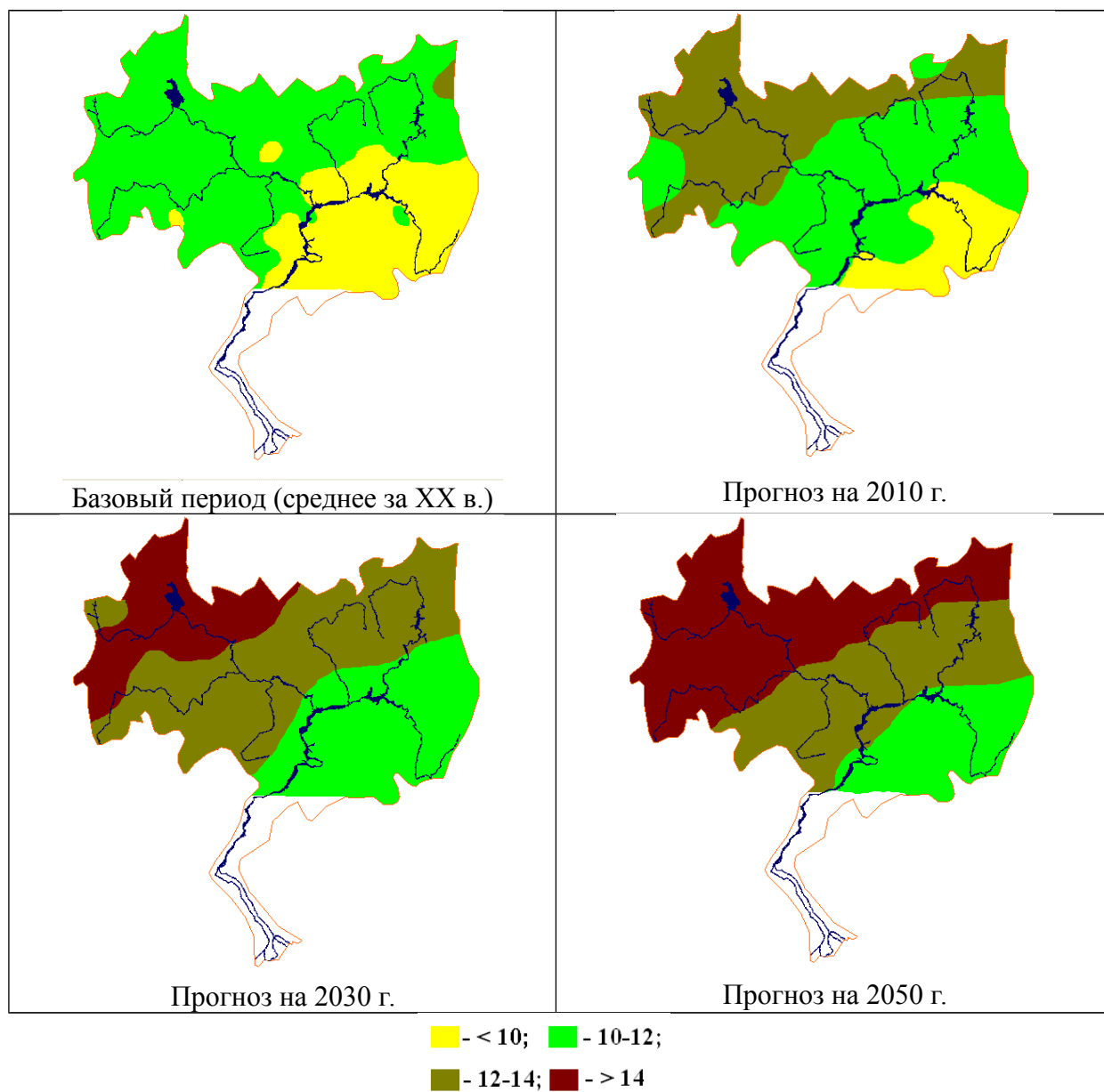


Рисунок 1 - Первичная биологическая продуктивность экосистем Волжского бассейна, т/га в год

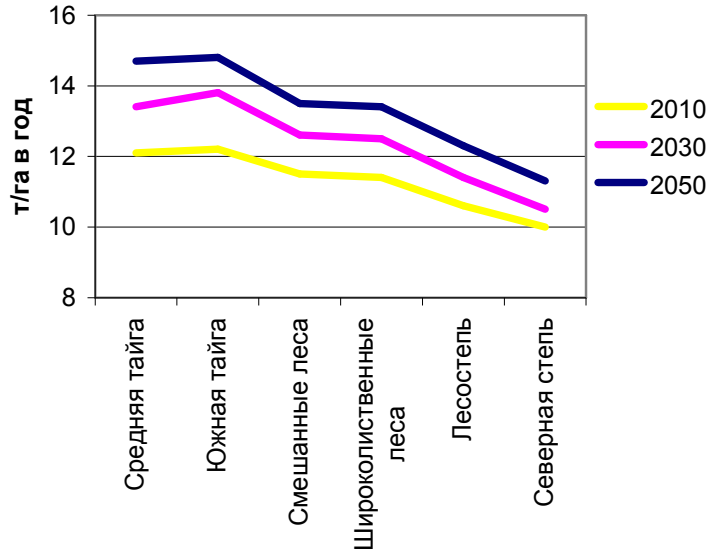


Рисунок 2 - Прогноз изменения уровня продуктивности экосистем Волжского бассейна по природным зонам

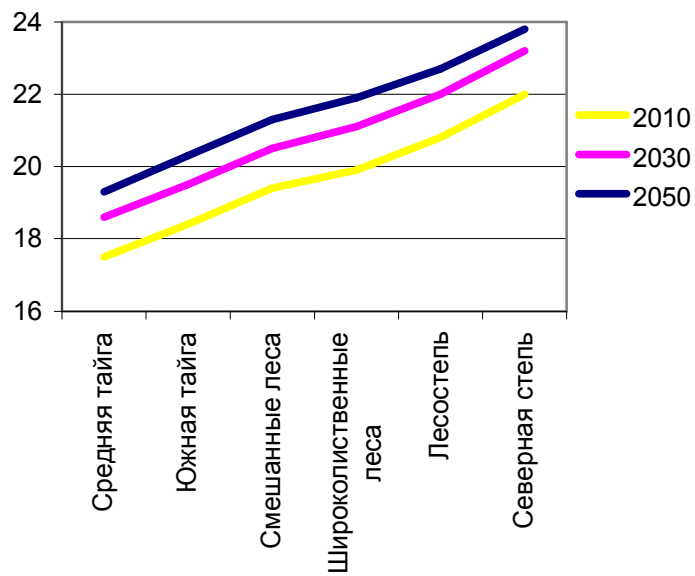


Рисунок 3 - Прогноз изменения температуры июля по природным зонам Волжского бассейна

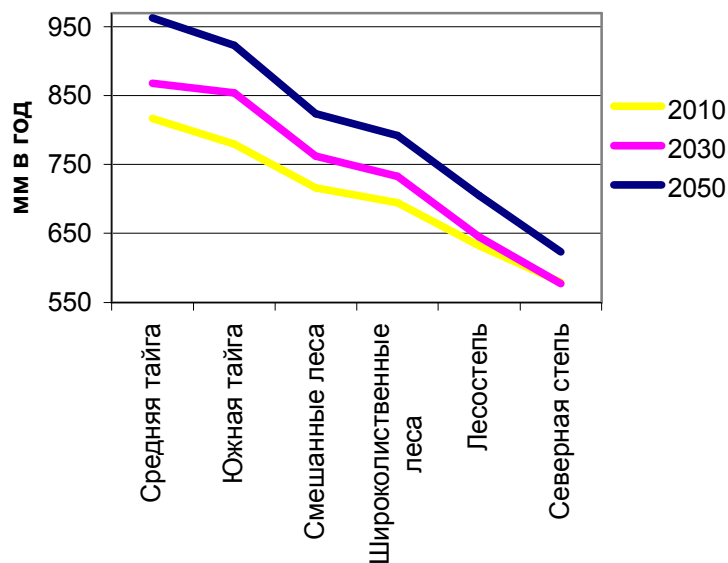


Рисунок 4 - Прогноз изменения годовой суммы осадков по природным зонам Волжского бассейна

В 2030 г. ожидается еще бóльшая аридизация лесостепной и степной зон. Летние температуры (рис. 3) здесь повысятся значительно, чем по всей территории Волжского бассейна. По сравнению с базовым периодом на 2,4°C. Сумма годовых осадков повысится менее, чем в два раза по сравнению с таежной зоной. Зимы хоть и станут потеплей, но снежный покров увеличится не намного. Поэтому и увеличение первичной продуктивности прогнозируется меньше, чем в остальных зонах. В зоне степи продуктивность увеличится на 1,7 т/га в год, а в зоне лесостепи – на 1,9 т/га в год (рис. 2).

Больше всего повышение уровня биопродуктивности ожидается в зоне южной тайги – на 2,8 т/га в год по сравнению с базовым периодом. Поскольку таежная зона является зоной недостаточной теплообеспеченности, то увеличение летних температур на 2°C может дать положительный эффект для увеличения продуктивности еловых лесов южнотаежной зоны, которые очень чувствительны к заболоченным почвам.

В зоне средней тайги, смешанных и широколиственных лесов увеличение уровня продуктивности ожидается на 2,4 т/га в год. Июльские температуры здесь увеличатся в среднем на 2°C, немного меньше в зоне средней тайги – на 1,7°C. Среднегодовые осадки в зоне смешанных и широколиственных лесов увеличатся чуть более чем на 100 мм в год (рис. 4), а в зоне средней тайги осадков ожидается больше – ближе к 130 мм в год. Надо отметить, что и зима здесь потеплеет больше, чем в других зонах и уровень годовой суммарной радиации увеличится больше всего – на более чем 500 МДж/кв.м.

Потепление климата, ожидаемое в 2050 г., будет наиболее благоприятным для биопродуктивности зон средней и южной тайги. Здесь она повысится на 3,7 т/га в год и 3,8 т/га в год соответственно. Июльские температуры повысятся в таежной зоне на 2,4-2,8°C. Существенное потепление ожидается в зимний период, особенно в зоне средней тайги, предполагается, что здесь температура января повысится на 5,7°C, что гораздо выше, чем в других зонах. От 200 до 220 мм в год

увеличится количество годовых осадков. Уровень годовой суммарной радиации опять же больше всего повысится в зоне средней тайги – на 640 МДж/кв.м.

В зоне смешанных и широколиственных лесов изменения гидроклиматических показателей будут происходить примерно на одинаковом уровне. Температура июля повысится на 2,8-2,9°C, зимние температуры на 4,1-4,3°C. Количество годовых осадков увеличится на 165-170 мм в год. При таких условиях климата уровень продуктивности увеличится на 3,3 т/га в год.

В зоне лесостепи и северной степи уровень продуктивности к 2050 г. так же, как и в лесной зоне, увеличится на одинаковую величину – 2,8 т/га в год. Температура июля в обеих зонах увеличится на 3,1°C, тогда как годовая сумма осадков в лесостепной зоне выше на 20 мм. Надо отметить, что по всей территории Волжского бассейна к 2050 г. влажность климата повысится, нежели в предыдущие прогнозируемые периоды.

Обобщая вышеизложенное, можно сказать, что в условиях изменения климата с возрастающим термическим трендом, по всем природным зонам территории Волжского бассейна прогнозируется увеличение (рис. 2) показателя первичной биологической продуктивности. Наиболее равномерное увеличение по всей территории предполагается на период 2010 г.

На период 2030 г. равномерное увеличение показателя предполагается в зонах смешанных и широколиственных лесов. В южнотаежной зоне наблюдается самый высокий уровень увеличения в этом периоде – на 2,8 т/га в год относительно базового периода. А в зоне средней тайги увеличение предполагается таким же, как и в зоне неморальных лесов – на 2,4 т/га в год. Наименьший уровень увеличения показателя ожидается в степной зоне, очевидно, потому, что этот период здесь ожидается самым засушливым. При увеличении июльских температур на 2,4°C, осадки увеличатся незначительно.

На период 2050 г. самое большое увеличение показателя относительно базового периода предполагается в южнотаежной зоне – на 3,8 т/га в год, а относительно предыдущего периода большее увеличение в зоне средней тайги – на 1,3 т/га в год, тогда как в остальных зонах на 0,9-1,0 т/га в год.

В связи с этим можно предположить, что условия повышения температуры (рис. 3) и уменьшения влажности климата (рис. 4), относительно благоприятно скажутся для экосистем таежной зоны – зоны недостатка тепла и избытка влаги. Менее благоприятным изменение климата окажется для лесостепной и степной зон, так как здесь ожидается еще большая аридизация климата.

По модели, где рассматривается сценарий с увеличением валового регионального продукта, наблюдается снижение уровня биопродуктивности. Причем, чем более промышленно развитый регион, тем больше он влияет на снижение уровня продуктивности экосистем. Так в регионах с высоким уровнем валового продукта (рис. 5), таких как Московская, Самарская, Пермская области и республика Татарстан биопродуктивность снижается в среднем на 0,5-0,6 т/га в год, в то время, как в регионах с низким уровнем развития промышленности, например, Ивановская и Пензенская области на 0,1-0,2 т/га в год. А в среднем по всему Волжскому бассейну на 0,3 т/га год.

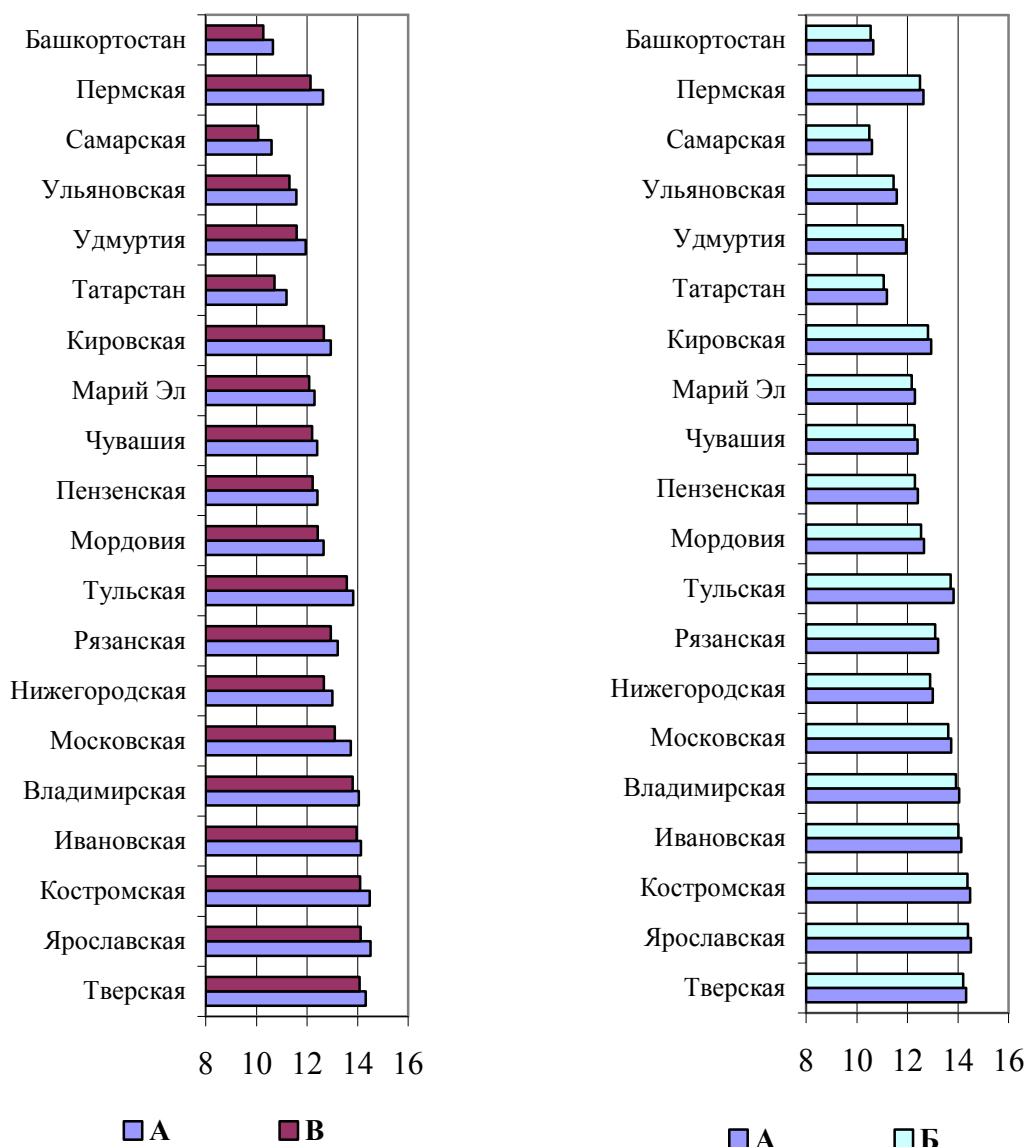


Рисунок 5 - Изменение уровня первичной биологической продуктивности Волжского бассейна на 2030 г. по административно-территориальным единицам

А – прогноз изменения первичной биологической продуктивности на 2030 г. при потеплении климата:

Б – с учетом увеличения суммарных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на 50%;

В – с учетом увеличения валового регионального продукта в 2 раза

По модели, где рассматривается сценарий с увеличением суммарных выбросов в атмосферу на 20%, уровень биопродуктивности практически не меняется (рис. 5). В связи с этим можно предположить, что растительные экосистемы, включая свои регулятивные свойства, более или менее справляются с выбросами в атмосферу (по расчетам специалистов, один гектар леса поглощает в год около 10 т CO₂). Но если суммарные выбросы увеличатся на 50%, то уже наблюдается снижение уровня биопродуктивности на 0,1 т/га в год по всей территории бассейна равномерно.

Заключение

Таким образом, на примере крупного экологического региона, как Волжский бассейн рассмотрены подходы к построению прогнозных моделей с использованием экспертной информационной системы REGION, которая позволяет разработать сценарии изменения состояния биоресурсов и осуществлять их графическое (картографическое) отображение. Полученные в результате построений модели дают возможность оценить изменение такого важного показателя функционирования природных экосистем, как первичная биологическая продуктивность в условиях глобального потепления климата. Совершенно очевидно, что повышение температуры при одновременном росте количества осадков приведет к активизации вещественно-энергетических процессов в экосистемах. Это означает существенный рост производства и разложения первичного органического вещества. Как показывают, полученные карто-схемы, наиболее резко повысят продуктивность бореальные леса благодаря своей максимальной чувствительности к повышению температуры. Их продуктивность поднимется до нижнего уровня производительности современных мезофильных лесостепей и луговых степей. В то время как продуктивность лесостепных и северостепных растительных формаций изменится незначительно. Осуществленный прогноз состояния первичной биопродуктивности в зависимости от антропогенного загрязнения показал, что выбросы в атмосферу парниковых газов не очень существенно снижают биопродуктивность. Больше отрицательное влияние оказывает на природные экосистемы уровень экономического развития регионов.

В заключение хотелось бы отметить, что в данной работе сделана попытка рассмотреть не только вопрос изменения функционирования природных экосистем в условиях меняющегося климата, но и затронуть влияние региональных и локальных антропогенных факторов, которые необходимо учитывать при формировании природно-антропогенных геосистем в условиях устойчивого развития регионов.

Благодарности

Авторы благодарны профессору В.К. Шитикову (Тольятти) за обсуждение рассматриваемых проблем, а также Программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологические ресурсы России» и грантам РГНФ (15-12-63006 и 16-16-63003) за частичную финансовую поддержку работы.

References

1. Алексеев В.В., Киселев С.В., Чернова Н.И. Рост концентрации CO₂ в атмосфере – всеобщее благо? // Природа. 1999. № 9. С. 3-13.
2. Emanuel W.R., Shugart H.H., Stevenson M.P. Climate change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes // Climatic Change. 1985. No. 7. P. 29-43.
3. Будыко М.И. Климат конца двадцатого века. Метеорология и гидрология. 1988. № 10. С. 5-24.
4. Kangalawe R., Mwakalila S., Masolwa P. Climate change impacts, local knowledge and coping strategies in the Great Ruaha River Catchment Area, Tanzania // Natural Resources. 2011. V. 2, No. 4. P. 212-223.
5. Prentice I.C., Cramer W., Harrison S.P., Leemans R., Monserud R.A., Solomon A.M. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties, and climate. // J. Biogeography. 1991. V. 19. P. 117-134.

6. Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Турчинович И.Е. Влияние лесного покрова на эмиссию углекислого газа в атмосферу // *Лесоведение*. 1993. № 3. С. 7-15.
7. Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
8. Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность: атлас-монография. М.: Наука, 2005, 390 с.
9. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008, 427 с.
10. Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С. Локальный мониторинг глобальных изменений природной среды: проблемы и перспективы // *Изв. СамНЦ РАН*. 2000. Т. 2. № 2. С. 200-205.
11. Leemans R. Modelling for species and habitats: new opportunities for problem solving // *Science of the Total Environment*. 1999. V. 240. P. 51-73.
12. Мина В.Н. Круговорот азота и зольных элементов в дубравах лесостепи // *Почвоведение*. 1955. № 6. С. 32-44.
13. Kauppi P., Posch M.A. A case study of the effects of CO₂ induced climatic warming on forest growth and the forest sector: A. Productivity reactions of northern boreal forests // M.L. Parry, T.R. Carter and N.T. Konijn, Eds. *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*. Dordrecht et al.: Kluwer Acad. Publ., 1988. V. 1, P. 183-195.
14. *The State of the World's Forests 2003*. Rome: FAO Publ., 2004.
15. Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Естественнаучные основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ; Ин-т географии РАН, 2003. 239 с.
16. Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С. Палеопрогнозная концепция в региональной экологии (на примере Волжского бассейна) // *Успехи совр. биол.* 2004. Т. 124, вып. 5. С. 403-418.
17. Алексеев В.А., Бердси Р.А. (ред.). Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск. 1999. 232 с.
18. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. СПб.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
19. Кононова М.М. Некоторые биохимические проблемы почвоведения в АН СССР // *Изв. АН СССР. Сер. биол.* 1974. № 6. С. 785-798.
20. Розенберг Г.С. Волжский бассейн: на пути к устойчивому развитию. Тольятти: Кассандра, 2009, 478с.
21. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 263 с.
22. Дроздов А.В. Продуктивность зональных наземных растительных сообществ и показатели водно-теплового режима территории // *Общие теоретические проблемы биологической продуктивности*. Л.: Наука, 1969. С. 33-65.
23. Григорьев А.А., Будыко М.И. О периодическом законе географической зональности // *ДАН СССР*. 1956. Т. 110. № 1. С. 129-132.
24. Дылис Н.В., Носова Л.М. Фитомасса лесных биогеоценозов Подмосковья. М.: Наука, 1977. 144 с.
25. Утехин В.Д. Первичная биологическая продуктивность лесостепных экосистем. М.: Наука, 1977. 146 с.
26. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах Европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 362 с.
27. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). Л.: Наука, 1980. 220 с.
28. Костина Н.В., Розенберг Г.С., Шитиков В.К. Экспертная система экологического состояния бассейна крупной реки. *Изв. СамНЦ РАН*. 2003. Т. 5, № 2. С. 287-294.

Розенберг Г.С., Костина Н.В., Кузнецова Р.С., Саксонов С.В.

29. Костина Н.В. REGION: Экспертная система состояния и управления биоресурсами. Тольятти: СамНЦ, 2005. 132 с.
30. Лиела И.Я. Показатель удельного влияния факторов воздействия // Уч. зап. Латв. ун-та: Рига, 1971. С. 36-40.
31. Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 172 с.
32. Костина Н.В. Анализ состояния и сценарии развития социо-эколого-экономических систем территорий разного масштаба с помощью экспертной информационной системы REGION. Тольятти: Кассандра, 2015. 200 с.

Сведения об авторах

Розенберг Геннадий Самуилович, чл.-корр. РАН, д.б.н., профессор, директор Института экологии Волжского Бассейна РАН, 445003, Российская Федерация, Самарская область, г. Тольятти, ул. Комзина, д.10, E-mail: genarozenberg@yandex.ru
Костина Наталья Викторовна, к.б.н., старший научный сотрудник Института экологии Волжского Бассейна РАН, E-mail: knva2009@yandex.ru
Кузнецова Разина Саитнасимовна, к.б.н., научный сотрудник Института экологии Волжского Бассейна РАН, E-mail: ievbras2005@mail.ru
Саксонов Сергей Владимирович, д.б.н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт экологии Волжского бассейна РАН, E-mail: svsaxonoff@yandex.ru

"GLOBAL WARMING" SCENARIO AND FORECAST OF PRIMARY BIOLOGICAL PRODUCTIVITY ON THE TERRITORY OF THE VOLGA RIVER BASIN (RUSSIA)

**Gennady S. Rozenberg, Natalia V. Kostina, Razina S. Kuznetsova,
Sergey V. Saksonov**

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

Abstract

On the example of a large region (the Volga river basin) there was given the forecast of primary biological productivity changes in conditions of «global warming» scenario using the expert informational system «REGION». There were considered the types of influence on biological productivity of anthropogenic pollution (atmospheric emissions) and the level of economic development of the regional subjects.

Keywords: the Volga basin, climate warming, biological productivity, expert system.

1. Introduction

Among the pressing ecological problems there is emerging the research task of consequences of global changes in the environment associated with a man's impact on climatic system of the Earth. It is assumed that forthcoming global climate changes will be connected first of all with anthropogenic growth of CO₂ content and other greenhouse gases in atmosphere that can break a natural carbon cycle in biosphere and lead to variety of negative consequences.

Increase of greenhouse gases in atmosphere took place during last epochs, but it never occurred so quickly. In the past the climate and biosphere of the Earth owing to the gradual changes of atmosphere composition had time to pass in a new steady state and were in quasiequilibrium, but in modern period biosystems are outbalanced due to intensive, rocking change of gas composition of the atmosphere. The effect of such «quasi-stationary state» take out can be severe [1].

In scientific literature there are described main global (and partly regional) forecast characteristics of both forthcoming and present anthropogenic hydroclimatic changes: temperature conditions and atmospheric humidifying, evaporation, river drain and other parameters [2-4], and also structural-functional shifts in vegetation cover and natural ecosystems in whole [5, 6]. However these forecast developments have rather schematic character and are aimed mainly at the estimation of general future condition of biosphere as planetary system

Climate changes of the Earth occurred during all epochs. These changes were caused by different reasons, including the extraterrestrial ones. However the natural processes resulting these changes result variously in various places and it defines regional variety of biosphere. Therefore, it is obvious that possible negative effects of global climate changes should be considered at regional level.

Methods of regional and furthermore local forecasting remain still poorly developed that is connected with both lack of actual material and basic methodical difficulties. First of all, the reaction of ecological (climatic) niches of soil-phytocoenotic core of regional and local ecosystems on reorganization of background atmospheric

processes remains unclear. The basic researches, obviously, should be directed on the search of equilibrium processes which provide stability of natural ecosystems in changing conditions [7-10].

Predicted climate changes, inevitably should have an essential effect on natural ecosystems, shift of natural zones. Various techniques [8, 11] and paleo-analog scenarios of the future climate [9] are used for the forecast of similar changes.

Researches show that for plain territories placing of natural zones corresponds to certain intervals of evaporating capacity values and dryness index. During the value reversal of dryness index in limits from 0,3 to 1,0 which corresponds to tundra and forest-tundra, conifers, mixed and broad-leaved forests, distribution of natural zones depends mainly on temperature mode and consequently on evaporating capacity. Localization of natural zones is defined mainly by humidifying conditions at higher values of evaporating capacity to precipitations ratio corresponding to forest-steppe, steppe, semi-desert and desert.

Researches on the basis of paleobotanic and paleoclimatic data, have shown that possible changes of condition of ecosystems and the natural zones, caused by climate changes, can be rather huge. It is assumed that already at the increase of global average temperatures by 1-2 °C the Arctic continental tundra in Europe can disappear almost entirely and its southern border in Asia can greatly move north. Northern border of taiga woods is also considerably to be displaced to coast of Arctic ocean, and their southern border at global warming by 1,0 °C will be at 60-65 °n. l. At increase in global temperature by 2,2 °C in some areas the southern border of taiga woods can reach 67 °n. l. [12].

Southern areal of modern coniferous woods at global warming will be occupied by the mixed forests which advance north almost 10 degrees at increase in temperature by 2,2 °C. Forest-steppes thus also considerably will advance north, west and east. Steppes in the east will occupy territories of modern coniferous woods, and in the south – partially deserts and semi-deserts.

According to the forecast, tundra and forest-tundra areas will be considerably reduced. So, if now tundra and forest-tundra occupy approximately 19,5 % of territory at warming by 2,2 °C these zones will occupy only 3 % of its area. As to coniferous woods – their areas also can be reduced from 38,7 % to 11,3 %. The area of broad-leaved forests thus, on the contrary, will extend from 1,1 % to 14,5 %. The areas of forest-steppes will increase in 2,3 times, and steppes – in 1,8 times. It is important to notice that for global warming by 2,2 °C it's typical some steppification of territories, namely, reduction of total forests area by 5,6 %. Tendency to desertification at changes of temperature and precipitations according to paleo-analog scenarios should not develop [12].

There are also other constructions [6, 13, 14] which in the majority forecast the greatest changes in northern regions. So, according to one of them, at doubling of concentration CO₂ in atmosphere the tundra area can be reduced to 32 %, boreal forests – to 37 %. Others on the contrary consider that such conditions will be favorable for the distribution of forests. According to some models which consider the change of precipitations rate, predict vegetation changes by 60 % of land territory. According to these estimations, the areas of tundra, coniferous forests and light forests, arid regions and deserts should be reduced considerably.

Generalizing the results received on various models, one can say that except for some contradictions, the general tendencies in change of natural vegetation at global warming are obvious. So, all authors conclude the reduction of tundra zone and boreal forests, steppe formation increase, possible reduction of the arid territories area.

2. Part of forest ecosystems in biospheric processes

The territory of the Volga river basin considered in the given article is mainly distributed in forest zone. The problem of preservation of forest ecosystems and reproduction of forest resources for the European Russia always was and is of great importance, as here there was historically a main industrial center of the country. Now in solution of this problem the increasing value is got by questions of stability of natural ecosystems as natural-historical basis of sustainable development of the region [7].

In conditions of changing climate, this problem is especially pressing at southern border of boreal belt where forest communities are in conditions close to the critical ones. Stabilization of continental biosphere which defines ecological safety of large territories essentially depends on condition of the localized zonal-regional types of ecosystems, and first of all two competing vegetative formations – forest and herbosa [15, 16].

Forests are the major manufacturers of biological productivity of natural ecosystems. Occupying 1/3 of land, they synthesize almost 2/3 of its organic weights and about half of all organic mass of the Earth. Forests have huge value as a renewed source of power resources, representing most widespread, most complex and significant for biosphere type of ecosystems.

At the same time forests are the major regulator of the large-scale natural processes having global influence on biosphere, in many respects defining its quality and condition. Forests possess a leading part in environment stabilization. They have the maximum biological productivity, huge influence on gas, hydrological and thermal rates and support natural microclimate and climate as a whole. The condition of forests in many respects defines ecological conditions both on the whole planet and on its individual regions.

Forests make essential impact on the carbon budget of atmosphere. For territories of forest fund are saved up hundred billions tons of phytomass and dead organic materials the carbon maintenance in which reaches half of their gross weight. Carbon stocks in phytomass of forest vegetation are estimated in limits from 33 to 35 billion tons [17].

Forecasting of global warming first of all will affect natural situation in high and middle latitudes, so, in forest vegetation. It is natural that the researches, concerning absorption by plants atmospheric CO₂, durations of deduction of carbon in ecosystems, mathematical modeling of its basic flows in macrosystem «atmosphere – forest vegetation – soil», are rather essential to establishment of the role of land and ocean in stabilization of biospheric processes [6].

In biospheric processes the great attention [6, 18, 19, etc.] recently is given to carbon circulation. The basic attention in these works is given to methods of carbon definition in vegetation and soil as well as to databases formation of its content in forest, marsh and other ecosystems. There are few researches devoted to the forecast of climatogenic dynamics of parameters, carrying out biotic regulation of carbonic content of gas in atmosphere [20]. For the last years the researches by Erland G Kolomyts are devoted to the solution of this problem within the scope of the concept of biotic regulation of carbon cycle in biosphere [7-9].

3. Distribution features of land ecosystems' productivity

Primary biological productivity represents fundamental property of biosphere, provides its energy resources and is the major parameter of ecosystems functioning in which basis small biological cycle lies. It concerns indicators of stability of environment as reflects the ability of ecosystem to restore itself in case of anthropogenic alterations as soon as possible.

The greatest productivity belongs to the herbaceous vegetation and grass- lignose at sufficient humidifying and fertile soils of floodplains and lakeside trenches, in tropics and subtropics. Forest productivity is higher than that of the herbaceous vegetation outside of floodplains; it decreases at transition from rainforests to those of moderate, and then boreal zones.

Productivity and the general reserve of vegetative biomass are defined first of all by heat and moisture supply. Humidification level essentially affects productivity in steppe and forest-steppe zones. Humidification increase in the zones provided with heat well enough, leads to productivity substantial growth. The opposite occurs at heat lack. So, in average and northern taiga marshland, due to the high level of humidification, leads to decrease of forest productivity.

Diversity of vegetative communities is defined by geological, geomorphological and climatic heterogeneity. The role of separate factors in distribution of vegetative communities is ambiguous. The climate which is defining in distribution of those areas or vegetative communities is most closely connected with ecosystems productivity. Bottoms, lay of land and soil cover specifics define local features of production processes [21].

Considerable latitudinal and longitudinal extent of Russia causes essential variety of environment. Annual bioproductivity changes in its territory in very wide limits. The highest bioproductivity is observed in herb marshes within dry steppes of the European part of Russia and in south taiga meadows of the Far East and reaches to 40 t/hectares a year; in meadow steppes, steppes and meadows of steppe zone it sometimes reaches 20 t/hectares a year. Forests are in between, for example, productivity of spruce forests changes within 4,6-13,1 t/hectares a year, and that of pine forests – 2-10 t/hectares a year. Rather low productivity is in tundra, 1,5-5,4 t/hectares a year, and minimum – in the Arctic deserts, only 1 t/hectare a year. It appears from this that productivity is closely connected with temperature condition.

Productivity increases from north to south in overwet marshy intrazonal communities. In polar and boreal belts it is less or is comparable to indicators of zonal communities, but in south it increases and considerably exceeds the zonal ones.

As a whole productivity changes greatly within a forest zone. It decreases from west to east. Meridional distinctions are practically absent in forest-tundra and forest-steppe.

Spatial changes are also observed within one type of vegetation as different vegetative communities differently react to changes of temperature and moisture rate. For example, in fur spruce and pine forests productivity changes slightly at the change of mid-annual temperature by 1 °C , and in larch and dark coniferous polydominant forests – almost in 10 times. Fir groves most strongly react to changes of the annual precipitations totals [21].

The analysis of materials allows marking major hydrothermal boundaries defining the set of characteristics of biological productivity. In the European territory of Russia the main boundary is traced on the zone edge of broad-leaved forests [21]. The marked boundary approximately corresponds to that boundary which is characterized by the radiation balance value of 145 kJ/sm²/year [22] and dryness index close to 1 [23].

The set of hydrothermal areas of sufficient humidification, but insufficient heat provision lies to the north from this boundary. Damp area of boreal belt corresponds to it.

South from this boundary there are three sets of areas of sufficient heat provision, but various degrees of humidification. The first set represents the areas of both sufficient heat provision and humidification. These are damp and semidamp areas of subboreal belts (broad-leaved subboreal forests, meadow subboreal steppes). The second set unites the areas of sufficient heat provision, but insufficient humidification. These are semiarid areas

of subboreal belts (steppes and dry subboreal steppes). The third set is the areas of excessive heat provision and insufficient humidification. There correspond arid regions of subboreal belts (semi-deserts and deserts).

4. Characteristics of ground biocenosis of the Volga river basin

According to the scheme of land division of the Earth on thermal belts and bioclimatic areas [21], within the Volga river basin there are distinguished boreal and subboreal thermal belts. Forests apply to the boreal belt, damp and semidamp bioclimatic areas of subboreal belt.

Extensive spaces of northern limits of the Volga river basin are occupied with formation of spruce forests. The zone of average taiga lies here. The common spruce dominates in its western part; Siberian spruce is in the east. Spruce forests are widespread outside of taiga zone as well, penetrating south into broad-leaved-coniferous zone. Grassy fir groves dominate here; sometimes these are fruticulose-grassy. [13]. One should mention that the maximum productivity of spruce forests is marked on the southern border of their distribution area. It is completely defined by potential possibilities of the given breed and environment, first of all riches of soils to which the spruce is especially sensitive, and also by the low level of marshiness as the spruce avoids gley soils.

The wide belt of broad-leaved-coniferous forests gradually narrows from west to east to The Ural Mountains, and they stretch from the western borders of the Volga river basin, covering Smolensk-Moscow Elevation and the Vjatsko-Kamsky basin in the east. The structure of broad-leaved-coniferous forests species includes English oak (*Quercus robur*), often small-leaved linden and other broad-leaved species. Broad-leaved-coniferous forests aren't stretched by a continuous belt; they are rather characterized by dissemination in the same zone as of spruce, pine, small-leaved-coniferous and small-leaved forests. The productivity of oak-linden-spruce grassy forests of the western part of the broad-leaved-coniferous forests basin zone is [24] high enough.

The zone of broad-leaved forests within the Volga river basin is stretched by more and more narrowed belt from west to east. It consists mainly of grassy oak-groves of English oak, as well as lime-tree forests of small-leaved linden. Lime-tree forests bent basically for the east.

However broad-leaved forests meet outside of the zone broad-leaved forests zone as well. Their large forest tracts are frequent in the broad-leaved-coniferous forests and in forest-steppe zones. Their separate forest tracts come into the steppe zone. In this connection the productivity indicators of broad-leaved forests vary greatly. Nevertheless, there is traced the general tendency to the annual productivity increase from the broad-leaved-coniferous forests zone to the broad-leaved ones, and some indicators especially decrease in the zone of forest-steppe and the steppe [21]. Broad-leaved forests are much more productive within the actually zone of broad-leaved forests.

Productivity is at the maximum in 70-80 years old forests. It considerably decreases in overripe oak groves [16, 25] where tree waste exceeds production that proves the destruction of these oak groves.

Broad-leaved forests productivity within the steppe zone where it is formed both in gullies and interfluvies, decreases even more on average indexes in comparison with the broad-leaved forests of the proper broad-leaved forests zone [21].

Radical (primary) and secondary growth forests of Scotch pine (*Pinus sylvestris*) are widely-spread, from northern borders of the Volga river basin to steppe zone inclusive. Mostly they apply to sand or solid rocks yield. Pine forests productivity within the same zones is close enough to that of radical spruce and larch forests.

Pine forests in the zone of broad-leaved-coniferous forests occupy extensive outwash plains. Here productivity is rather low of both [24] suffruticous and grassy or with considerable participation of grass.

Pine forests are also wide-spread in the broad-leaved forests zone. The general productivity indicators of pine forests of all types here decrease, that is apparently connected with less favorable conditions of humidification.

Small-leaved and small-leaved-coniferous forests of common birch mainly and aspen are extremely wide-spread from average taiga to steppe zone inclusive. The majority of small-leaved and small-leaved-coniferous forests is secondary on the place of the cut down radical woods.

Birch and spruce-birch forests are extended widely in southern taiga as radical forests here have undergone to especially intensive throws. In the basin of the top Volga suffruticose birch forests have the least level of productivity. The production is formed mainly at the expense of green assimilating bodies in all types of birch forests. There is traced the connection of productivity value and forests age and it comes to light that the maximum productivity in suffruticose and grass-suffruticose birch forests is inherent in to those at the age of 50-60 years, and in grassy birch forests – at the age of 40 years.

Aspen forests are widespread along with the birch, mainly second growth ones in south taiga zone. Aspen forests, mainly grassy, have a higher productivity level than birch ones. The aspen is the most productive in second growth, its productivity usually above that of radical forests of the same habitats. The maximum productivity values are traced in aspen forests at the age of 40-45 years that was also stated for grassy birch forests. However unlike them in production of aspen forests the leading part belongs to wood that puts them in one line with broad-leaved forests.

Generalizing distribution mechanisms of productivity indicators of various forest types spread in the Volga river basin, one can say that higher productivity of radical forests of all zones is here. It is significant that within each province the maximum productivity of boreal formations of both radical and second growth forests are marked in southern taiga zone. They slightly decrease in broad-leaved-coniferous forests zone and considerably fall in forest-steppe and steppe zones. The highest level of productivity is in subboreal broad-leaved forests in broad-leaved forests zone. Their productivity falls in the zones of forest-steppe and steppe [21].

Productivity of second growth pine forests is either equal or slightly below the productivity level of radical forests in all zones. Productivity of small-leaved radical and second growth forests, especially that of birch ones, is considerable low the level of productivity of coniferous radical forests, as well as the pine ones. Thus productivity of aspen forests is usually higher that that of the birch ones.

One can mention an important regularity: the indicator stabilization is marked at the productivity increase in taiga zone forests and at south advancement in the zones of broad-leaved-coniferous and broad-leaved forests [21]. It is connected with energy redistribution by coniferous and broad-leaved wood species. The latter have greater respiratory expenditures. Productivity decrease from broad-leaved forests zone to that of forest-steppe is caused by increase of moisture deficiency.

Within the Volga river basin steppe vegetation is presented by the zone of meadow steppes and the zone of moderately arid steppes. The vegetative cover of steppes is homotypic and consists of the representatives of rootstock grasses and bunchgrasses, and steppe mesoxerophilous and xerophilous herbs [21].

Now steppes are almost completely tilled, sites of natural steppe vegetation have remained only in the reserved territories, gullies and forest edges. Productivity of meadow

steppes which are basically present in the southwest of the Volga basin is mainly formed by underground bodies.

The zone of moderately arid steppes in territory of the Volga basin is presented mainly in the south of Samara region and partially in the southeast of Bashkiria. Productivity of moderately arid steppes is much less, than that of meadow steppes due to long-term duration of summer period.

Meadows, both continental and floodplain, in steppe zone occupy considerable enough areas. Continental meadows are formed at wood glades and edges (forest-steppe), on slopes of steppe dens, in before gully falls, lake hollows. They are characterized by high indicators of productivity [26]. It is necessary to notice that in the zone of moderately arid steppes, there are the same types of meadows, as in the zone of meadow steppe. In left-bank part of the average Volga basin the general productivity of mesophytic meadows is lower, than in the steppes zone, and the significance of green part in them is also higher [27]. Solonetzic meadows in moderately arid steppes at meadow cortical solonetz are characterized by much lower indicators [27], than similar meadows of meadow steppes zone.

Steppe landscapes are notable for great contrast of biological efficiency indicators between zonal and intrazonal formations, rather than wood landscapes. The most productive are meadow steppes, and in process of advancement south and salinization of soils their efficiency decreases. Underground bodies dominate in production structure of steppe formations.

High productivity level in grassy ecosystems becomes clear from the statement that being in the area of maximum fluctuation of hydrothermal indicators on years, they try to use in full conditions of the year vegetative period, providing each time the maximum productivity at the given temperatures and humidification. On the north and on the south this indicator decreases quickly as in dry steppes the productivity is limited by water-supplies or its salinity. Forest ecosystems being seral more mature and growing in stable climate of the North, are characterized by formation of greater phytomass reserve, instead of the maximum production.

5. EIS REGION as a forecasting tool

Expert information system REGION (EIS REGION), developed in the IEVRB RAS, was one of the first experiences of complex analysis of space distributed information and unites in itself the hierarchy of various regional level bases [20, 28, 29, 32, etc.].

The system is intended for the databases storage, their analysis and visualization of the processing results. It represents a complex of the programs united in a single whole, meeting various challenges using information objects held in the system dataware in the course of interactive work with a user.

The primary goal of system is not only information storage on ecological indicators, but forecasting the scenarios of ecological state of regions at different variants of social and economic development, the forecast of change of ecosystems functioning in conditions of climatic changes, ecological estimation of the territories using various algorithms of information processing. For this purpose as a part of the system software there is developed a library of methods and algorithms of research of cause-effect relations between the factors of ecological-economic system.

System REGION and corresponding bases of space distributed ecological data can be formally called «non-classical type» GIS. Its main difference from GIS is the refusal of strict description of purely geographical aspects of the territory. Any indicator (economic,

ecological, climatic and purely geographical) is «linked» to some sector of square or squared shape of big enough area.

The majority of the indicators estimating ecological state of the researched territory have an administrative-territorial binding relating to the present day ecological monitoring. The indicators characterizing environment, have, as a rule, more detailed information binding to the territory and don't depend on administrative division. Such indicators averaging within each sector leads to information loss of individual distinctions of separate territories within the sector. However it allows conducting the indicators balancing in order to get more reliable and comparable results. Thus, having given up on geographical esthetics which is hardly justified in relation to spaced distributed data, EIS REGION gets not less attractive qualities: cheapness, resources efficiency, ease of experience, operation and output data interpretation. The methods of multiple regression analysis excluding insignificant indicators are used for forecasting and evaluation of the probable territory development scenarios under man's impact and relation modeling.

Database of EIS REGION includes space distributed information on 24 regions and autonomous republics of the Volga basin which «cover» more than 80 % of all its territory. In total 41 administrative units (two of them – in Kazakhstan) make up the territory of the Volga basin.

Developing «space-coordinate» grid for the Volga basin territory there were singled out 210 sectors of 6,5 thousand km² individual area. The sector is understood elementary, no further split object of binding of the space-distributed information, i.e. it is accepted that each indicator in any point of a sector has identical numerical value.

The following circumstances were considered at the construction of a regular grid:

- convenience of coordinate binding, simplicity of construction and coverage of all territory;
- integrity of perception of the received results;
- the quantity increase in of sectors should be justified and proved by the research objectives, available space distributed indicators, their level of space distribution.

Initial material at the construction of regression models of primary biological productivity change in the territory of the Volga basin, depending on the forecasted climate changes, were the maps of scale 1 : 6 000 000 given in the atlas-monograph by Erland G. Kolomyts [8].

The Volga river basin occupies extensive territory – 1360 thousand km² that makes 62 % of the European part of Russia. It is stretched from north to south for 1910 km and from west to east for 1805 km (at top) [20]. The Volga basin includes the majority of natural zones – from taiga woods to semi-deserts. Object of attention of our work is the top part of the Volga basin where there are average and southern taiga, mixed and broad-leaved forests of midland and forest-steppe and northern steppe.

As it was specified above, the information on the picked sectors was written into the database EIS REGION. First of all, the space grid with 210 sectors was scaled for the given maps in order to get the required information. The binding was made on a coordinate grid and corrected on a hydrographic network.

The researched territory includes 144 sectors as in the atlas-monograph it is considered the boreal ecotone of the Volga basin, and some part of the territory remained out of sight of the author. Out of sample were Kaluga, Volgograd, Astrakhan regions and partially Tver, Perm, Saratov regions as well as the Republic of Bashkortostan. Hydroclimatic parameters were written into database REGION, such as average temperatures of January and July, annual total radiation and precipitation totals of cold and warm periods, calculated for the reference period (averages for the XX-th century). The

average indicator value was calculated for the sectors and then it was taken for each dot of the picked out sector.

The Volga basin covers main most highly industrialized part of the European territory of the country, where there is a very high level of anthropogenic load on natural ecosystems. Database EIS REGION contains a set of indicators of the anthropogenic component which calculation appears to be a distinctive feature of our model.

There was used the EIS REGION algorithm of multiple correlation regression excluding insignificant indicators [30] for the construction of forecasting model of primary biological productivity change at climatic changes and strengthening of anthropogenic load on ecosystems.

We get the equation (model) presented in the tab. 1 using hydroclimatic information of the reference period, and also some parameters of man impact on the Volga basin territory.

Table 1. Factors effecting primary bioproductivity

Factors included in regression model	Regression coefficients	Effect specific weight
Absolute term	-2,1800	
January temperature, °C	0,1132	5,30
July temperature, °C	0,2493	11,33
Precipitation total in cold period, mm	0,0148	19,71
Precipitation total in warm period, mm	0,0137	35,91
Annual total radiation, MJ/m ²	0,0001	1,15
Gross regional product in 2010, mln. rub/person	-0,0144	1,78
Total atmospheric pollutant emissions (average for 1995-2010), points	-0,0464	1,47
Multiple correlation coefficient		0,875
Accumulated sum of specific factors effect, %		76,65

The received results prove that the greatest contribution (35,9 %) to the bioproductivity level of vegetative formations was brought by precipitations total in warm period. One explains it the following way, plants water consumption in active vegetation reaches its maximums, and in July grassy plants pass exit phases in a corer, ear emergence (for grain crops) and flowering, and forest stands complete the formation of summerwood and proceed to latewood [31]. The precipitations share (19,7 %) in cold period is rather high as on it depends the degree of productive moisture in a meter ground layer in spring when there begins the period of active vegetation. The important factor for primary bioproductivity is the average temperature in July (11,3 %). The matter is that during the regional forecast-ecological researches [8, 10] there were empirically established close relations of the July productive moisture stocks in soil and annual factor of humidifying of Vysotsky–Ivanov. In turn, this indicator is defined almost exclusively by the average July temperature.

As parameters of man impact there are included in the model total pollutant emissions consisting of carbon oxide, nitric oxide, sulfur dioxide, etc. For calculations there are considered two variants of levels of polluting substances which exceed 20 % and 50 % the average index level for 1995-2000.

Other anthropogenic factor is gross regional product which is accepted to be 2 times higher than that in 2000. The higher gross regional product is, the higher is the developmental level of industry and agriculture in the region and, hence, man impact is

higher as well. The share of these indicators is rather low; still they influence bioproductivity in a negative way.

6. Results review

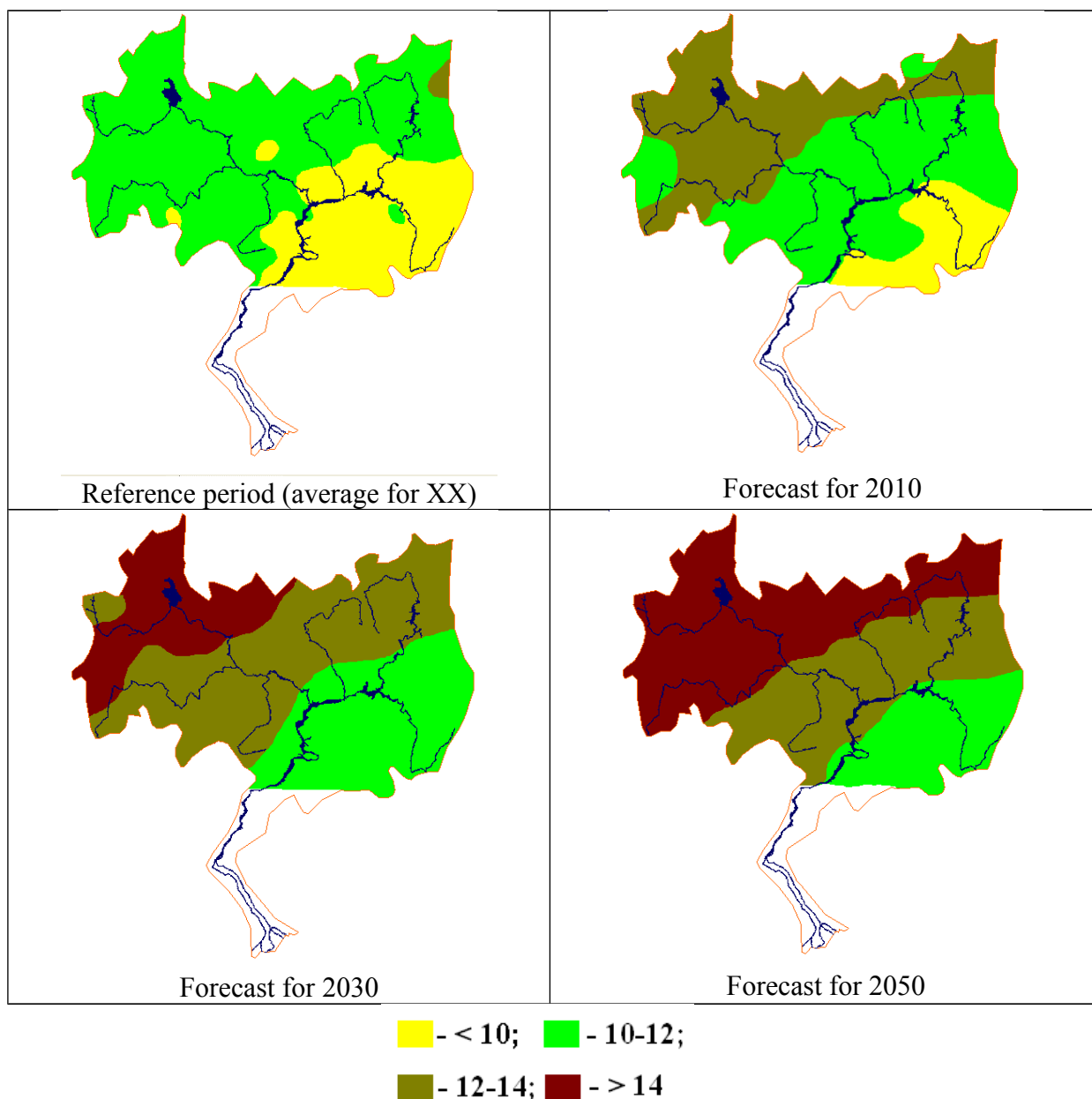


Figure 1 - Primary biological productivity of ecosystems in the Volga river basin, t/ha.

The derived model permitted to forecast the change of primary bioproductivity indicators under climatic changes (as in the work by Erland G. Kolomyts [8]) for 2010, 2030, 2050 (fig. 1). According to the received results one can notice that the level of primary bioproductivity on the whole territory of the Volga basin increases comparing to the reference period. So in 2010 at the increase in average July temperature by 1 °C and average annual precipitations by 60 mm, mean productivity value on the whole territory of the Volga basin will increase by 1,2 t/hectares a year. In 2030 at increase in average temperature values in the basin by 2 °C and precipitations by 110 mm the productivity will

increase by 2,4 t/hectares a year. And in 2050 at increase in average July temperature by 2,8 °C and average annual precipitations by 170 mm the level of mean bioproductivity value in comparison with the reference period can increase by 3,4 t/hectares a year.

If to analyze the change of productivity level on natural zones in the Volga basin, then there will be even indicator increase within all zones, but it will be a bit higher in the broad-leaved forests zone and a bit lower in forest-steppe than 1,2 t/hectares a year (fig. 2). All the more, July temperature in the forest-steppe and northern steppe zones will increase by 0,2 °C (fig. 3), comparing to the whole territory of the basin, but average annual precipitations level here is expected to be lower, than in other zones. Average annual precipitations level in forest-steppe will increase less than by 50 mm a year (fig. 4), and in the steppe zone by 55 mm a year. In steppe zone the level of summer precipitations will be almost 10 mm higher than that in forest-steppe as well as the milder winter, so therefore the productivity is higher than in forest-steppe.

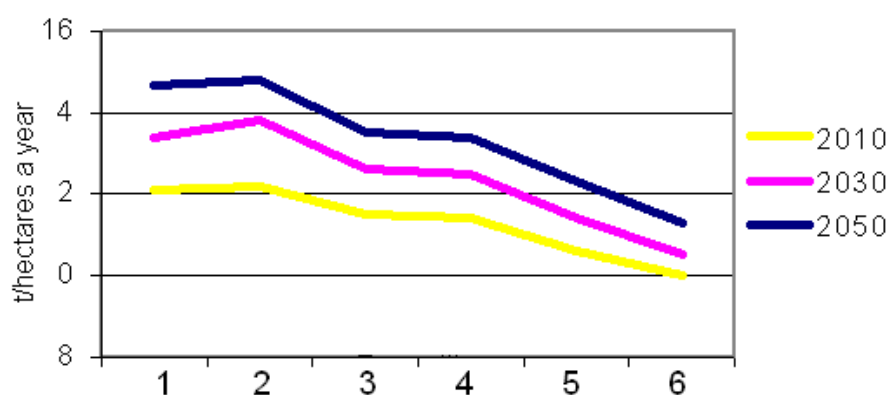


Figure 2 - Forecast for the level change of ecosystems productivity in the Volga river basin in natural zones. (t/hectares a year)

1. – middle taiga, 2. – south taiga, 3. – mixed forests, 4. – broad-leaved forests, 5. – forest-steppe, 6. – north steppe.

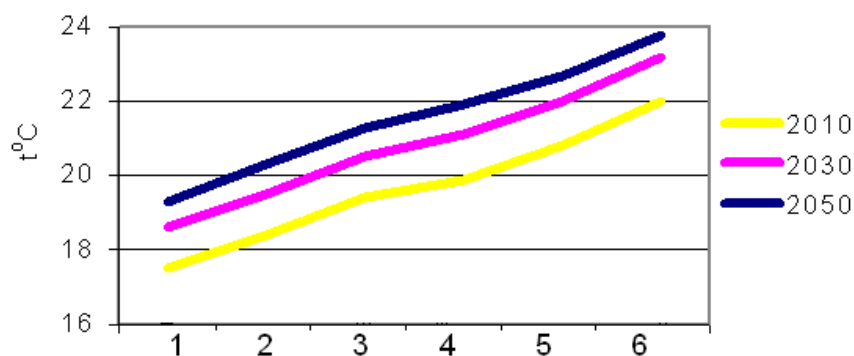


Figure 3 - Forecast of July temperature change in natural zones of the Volga river basin

1. – middle taiga, 2. – south taiga, 3. – mixed forests, 4. – broad-leaved forests, 5. – forest-steppe, 6. – north steppe.

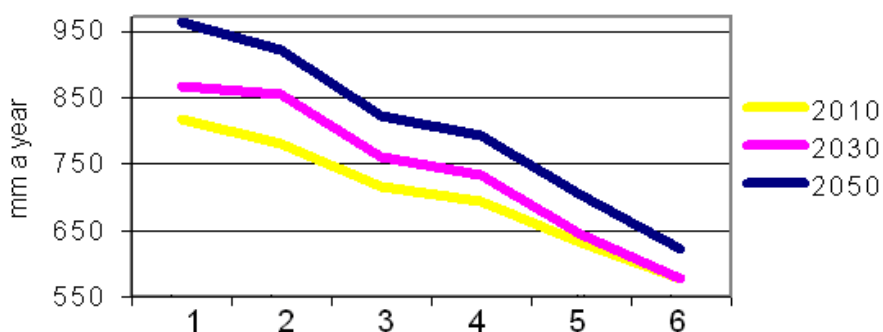


Figure 4 - Forecast of annual precipitation total in natural zones of the Volga river basin

1. – middle taiga, 2. – south taiga, 3. – mixed forests, 4. – broad-leaved forests, 5. – forest-steppe, 6. – north steppe.

In 2030 it is expected even greater aridization of forest-steppe and steppe zones. Summer temperatures (fig. 3) here will increase more considerably, than on the whole territory of the Volga basin; by 2,4 °C in comparison with the reference period. The annual precipitations total will increase less than twice in comparison with taiga zone. Winters though become warmer, but the snow cover will increase not much. Therefore the primary productivity increase is forecasted lower than in other zones. In steppe zone the productivity will increase by 1,7 t/hectares a year, and in the forest-steppe zone – by 1,9 t/hectares a year (fig. 2).

The highest increase of bioproductivity level is expected in southern taiga zone – by 2,8 t/hectares a year in comparison with the reference period. As taiga zone is the zone of insufficient heat provision the summer temperatures increase by 2 °C can positively affect the productivity increase of spruce forests in south taiga zone which are very sensitive to bogged soils.

In the zone of average taiga, there is expected the increase of bioproductivity level by 2,4 t/hectares a year in mixed and broad-lived forests. July temperatures here will increase by the average of 2 °C, and a bit less in the zone of average taiga – 1,7 °C. Average annual precipitations in the zone of mixed and broad-lived forests will increase hardly more than by 100 mm a year (fig. 4), and there are expected a higher level of precipitations in the zone of average taiga – about 130 mm a year. It is necessary to note, that winter here will become warmer than in other zones and the level of annual total radiation will be in the greatest increase – more than 500 MJ/m².

The climate warming expected in 2050, will be most favorable for the bioproductivity of average and southern taiga zones. Here it will increase by 3,7 t/hectares a year and 3,8 t/hectares in a year respectively. July temperatures will increase in taiga zone by 2,4-2,8 °C. Essential warming is expected during the winter period, especially in the zone of average taiga, it is supposed that here the temperature of January will increase by 5,7 °C that is greatly higher, than in other zones. Annual precipitations will increase by 200 to 220 mm a year. Again the level of annual total radiation will be of greatest increase in the zone of average taiga – 640 MJ/m².

The change of hydroclimatic indicators will occur approximately at the same level in the zone of mixed and broad-leaved forests. The temperature of July will increase by 2,8-2,9 °C, winter temperatures – by 4,1-4,3 °C. Annual precipitations will increase by 165-170 mm a year. Under such circumstances the climate productivity level will increase by 3,3 t/hectares a year.

The productivity level will be increased by 2050 by 2,8 t/hectares a year in the zone of forest-steppe and northern steppe as well as in the forest zone. The temperature of July in both zones will increase by 3,1 °C, whereas annual precipitation total in the forest-steppe zone – by 20 mm. It is necessary to notice that climate humidity will be increased by 2050 on the whole territory of the Volga basin as against the previous forecast periods.

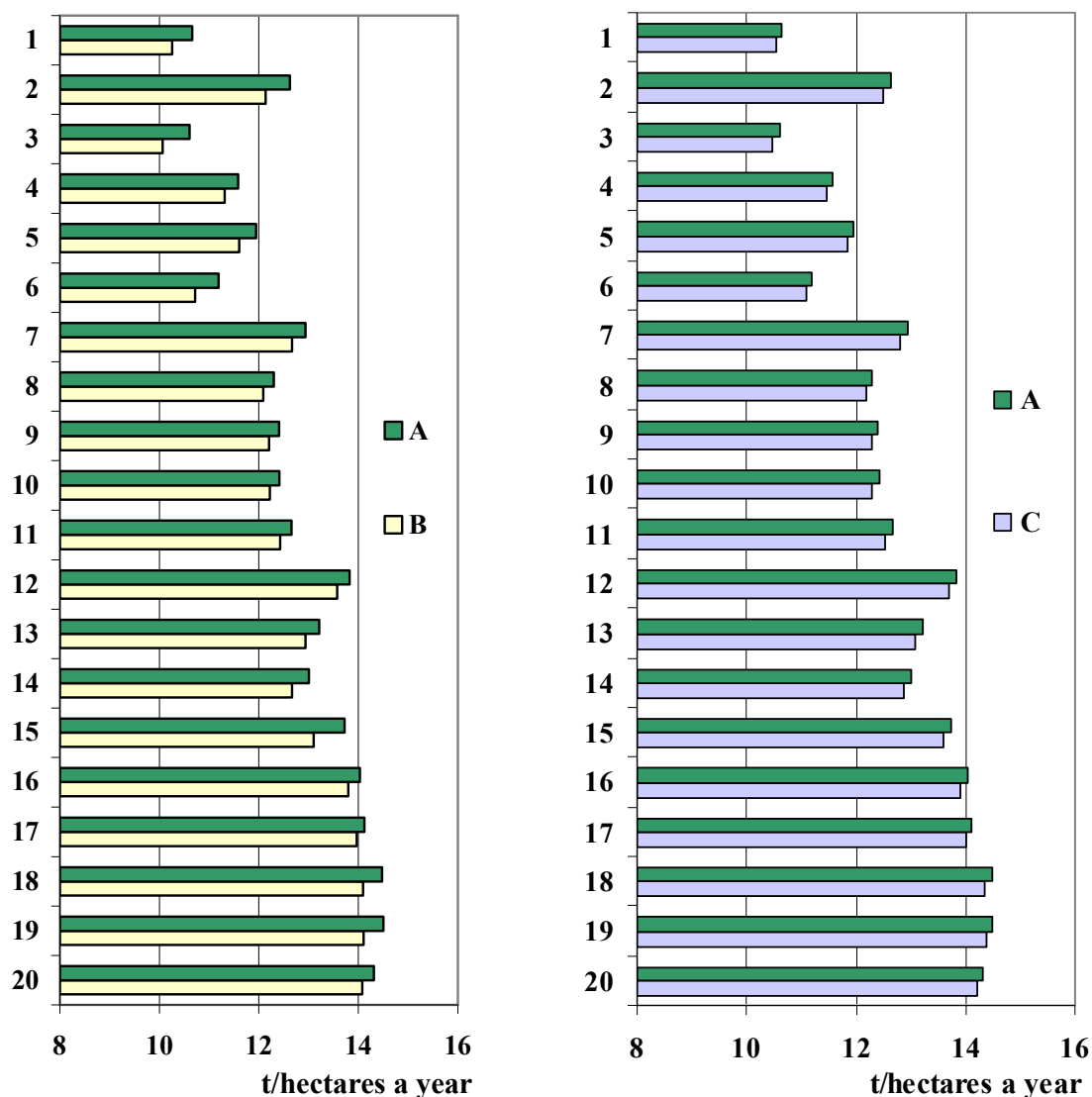


Figure 5 - The level change of primary biological productivity in the Volga river in 2030 according to political divisions

A – forecast for primary biological productivity in 2030 at global warming;

B – subject to 2 times increase of gross regional product

C – subject to 50% up increase of total atmospheric pollutant emissions;

1- Bashkortostan, 2 - Perm Region, 3 - Samara Region, 4 - Ulianovsk Region, 5 - Udmurtia, 6 -Tatarstan, 7 - Kirov Region, 8 - Mari-El, 9 - Chuvashia, 10 - Penza Region, 11 - Mordovia, 12 -Tula Region, 13 - Ryazan Region, 14 - Region of Nizhny Novgorod, 15 - Moscow Region, 16 - Vladimir Region, 17 - Ivanovo Region, 18 - Kostroma Region, 19 - Yaroslavl Region, 20 – Tver Region

Generalizing the above-stated, one can state that in conditions of climate change along with an increasing thermal trend, the increase of primary bioproductivity indicator is forecasted within all natural zones of territory of the Volga basin (fig. 2). The most even increase within the whole territory is expected in 2010.

The even indicator increase is expected in 2030 in the zones of mixed and broad-leaved forests. The highest level of increase in this period – by 2,8 t/hectares a year concerning the reference one is observed in south taiga zone. But in the zone of average taiga there supposed to be the same increase as in the zone of nemoral forests – by 2,4 t/hectares a year. The least level of indicator increase is supposed to be in steppe zone, apparently because of the fact that this period here is expected to be the driest one. The precipitations will increase slightly at the increase of July temperatures by 2,4 °C.

The biggest indicator increase in 2050 in reference to the reference period is expected in south taiga zone – by 3,8 t/hectares a year, and as for the previous period there will be a bigger increase in the zone of average taiga – by 1,3 t/hectares a year, whereas in other zones – by 0,9-1,0 t/hectares a year.

In this connection it is possible to assume that both temperature increase (fig. 3) and climatic humidity decrease (fig. 4) will rather favorably affect the ecosystems in taiga zone – the zone of insufficient heat and excess moisture. Climate change will be less favorable in forest-steppe and steppe zones as here it is expected even greater aridization of climate.

Bioproductivity level is decreasing according to the model considering the scenario of gross regional product increase. And, the more the region is industrially, the more it influences the decrease in the productivity level of ecosystems. So in regions with high level of national produce (fig. 5), such as Moscow, Samara, Perm regions and the Republic of Tatarstan the bioproductivity decreases on the average by 0,5-0,6 t/hectares a year, while in the regions with a low industry level, for example, Ivanovo and Penza regions – by 0,1-0,2 t/hectares a year. But on the average the decrease by 0,3 t/hectares a year is forecasted within the whole Volga basin.

Bioproductivity level practically doesn't change according to the model considering the scenario of increase in total atmospheric emissions by 20 % (fig. 5). In this connection one can assume that vegetative ecosystems, including their regulating properties, cope with atmospheric emissions more or less (according to the experts, one forest hectare absorbs about 10 tons of CO₂ a year). But if total emissions increase by 50 % then there is observed the decrease in bioproductivity level by 0,1 t/hectares a year evenly on the whole territory of the basin.

7. Conclusion

Thus, on the example of such vast ecological region as the Volga river basin, there were examined the approaches to the construction forecast models using EIS REGION which allows to develop scenarios of bioresources changes and display them graphically (cartographically). The received models give chance to estimate changes of such important indicator of natural ecosystems functioning as primary biological productivity at the global warming. It's clear that temperature increase at simultaneous precipitation growth leads to the activation of substance-energy processes in ecosystems. It means the essential growth of manufacture and decomposition of primary organic substance. According to the received maps and charts, boreal forests will most sharply raise the productivity owing to maximum sensitivity to temperature increase. Their productivity will rise to the bottom performance level of modern mesophilous forest-steppes and meadow steppes. While the productivity of forest-steppe and the North steppe vegetative formations will change slightly. The fulfilled forecast of primary bioproductivity depending on anthropogenic pollution has shown that atmospheric emissions of greenhouse gases reduce bioproductivity in inessential way. The level of economic development of regions has greater negative influence on natural ecosystems.

In conclusion allow to notice that in the given article there was made an attempt to consider not only the problem of functioning change of natural ecosystems at climatic changes, but also to touch upon the issue of regional and local anthropogenic factors necessary for considering at the formation of natural-anthropogenic geosystems in sustainable development of the regions.

Acknowledgements

The authors are grateful to Prof. Vladimir K. Shitikov for reviewing the Manuscript, and the anonymous referees of this Journal for many helpful suggestions. We also wish to acknowledge the State Support Programme of Leading Scientific Schools and the Program of Fundamental Scientific Research of the Department of Biological Sciences of RAS "Biological Resources of Russia" and grants of the Russian Humanitarian Scientific Fund (15-12-63006 and 16-16-63003), which partially funded the study.

REFERENCES

1. Alekseev V.V., Kiselev S.V., Chernova N.I. Growth in the Concentration of CO₂ in the Atmosphere – the Common Good? // *Nature (Russian)*. 1999. No 9. P. 3-13.
2. Emanuel W.R., Shugart H.H., Stevenson M.P. Climate change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes // *Climatic Change*. 1985. No. 7. P. 29-43.
3. Budyko M.I. The climate of the late twentieth century // *Meteorology and Hydrology (Russian)*. 1988. No. 10. P. 5-24.
4. Kangelawe R., Mwakalila S., Masolwa P. Climate change impacts, local knowledge and coping strategies in the Great Ruaha River Catchment Area, Tanzania // *Natural Resources*. 2011. V. 2, No. 4. P. 212-223.
5. Prentice I.C., Cramer W., Harrison S.P., Leemans R., Monserud R.A., Solomon A.M. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties, and climate // *J. Biogeography*. 1991. V. 19. P. 117-134.
6. Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchaninova I.E. The impact of forest cover on the emission of carbon dioxide in the atmosphere // *Forestry (Russian)*. 1993. No. 3. P. 7-15.
7. Kolomyts E.G. Regional Model of Global Changes of Natural Environment. Moscow: Science (Russian), 2003.
8. Kolomyts E.G. The Boreal Ecotone and Geographical Zonality: Atlas-monograph. Moscow: Science (Russian), 2005.
9. Kolomyts E.G. Local Mechanisms of Global Changes of Natural Ecosystems. Moscow: Science (Russian), 2008.
10. Kolomyts E.G., Rozenberg G.S. Local monitoring of global changes of natural environment: problems and prospects // *Proceedings of the Samara Scientific Centre of the RAS (Russian)*. 2000. V. 2, No. 2. P. 200-205.
11. Leemans R. Modelling for species and habitats: new opportunities for problem solving // *Science of the Total Environment*. 1999. V. 240. P. 51-73.
12. Mina V.N. The cycling of nitrogen and ash elements in oak woods of the forest-steppe // *Soil Science (Russian)*. 1955. No. 6. P. 32-44.
13. Kauppi P., Posch M.A. A case study of the effects of CO₂ induced climatic warming on forest growth and the forest sector: A. Productivity reactions of northern boreal forests // M.L. Parry, T.R. Carter and N.T. Konijn (Eds.). *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*. Dordrecht et al.: Kluwer Acad. Publ., 1988. V. 1, P. 183-195.
14. *The State of the World's Forests 2003*. Rome: FAO Publ., 2004.

*Gennady S. Rozenberg, Natalia V. Kostina, Razina S. Kuznetsova,
Sergey V. Saksonov*

15. Kondratyev K.Ya., Losev K.S., Ananicheva M.D., Chesnokova I.V. Natural-Scientific Bases of Life Stability. Moscow: VINITI (Russian), 2003.
16. Kolomyts E.G., Rozenberg G.S.. Paleo-forecast the concept of the regional ecology (on the example of the Volga Basin) // Successes of Modern Biol. (Russian). 2004. V. 124, No. 5. P. 403-418.
17. Alekseev V.A., Berdys R.A. (Eds.). Carbon in Ecosystems of Forests and Swamps of Russia. Krasnoyarsk: SB RAS, 1999.
18. Kobak K.I. Biotic Components of the Carbon Cycle. Leningrad: Gidrometeoizdat (Russian), 1988.
19. Kononova M.M. Some biochemical problems of soil science of the Academy of Sciences of the USSR and their modern development // Proceedings of the Acad. Sci. USSR, Ser. Boil. (Russian). 1974. No. 6. P. 785-798.
20. Rozenberg G.S. The Volga Basin: on the Path to Sustainable Development. Togliatti: Cassandra (Russian), 2009.
21. Bazilevich N.I. Biological Efficiency of Ecosystems of Northern Eurasia. Moscow: Science (Russian), 1993.
22. Drozdov A.V. Efficiency of zone land vegetative communities and indicators of a water-thermal mode of territory // General Theoretical Problems of Biological Efficiency. Leningrad: Science (Russian), 1969. P. 33-65.
23. Grigoriev A.A., Budyko M.I. About the periodic law of geographical ash value // Reports Acad. Sci. USSR. 1956. V. 110, No. 1, 1956. P. 129-132.
24. Dylis N.V., Nosova L.M. Phytomass of Wood Biogeocenoses of Moscow Suburbs. Moscow: Science (Russian), 1977.
25. Utehin. V.D. Primary Biological Efficiency of Forest-steppe Ecosystems. Moscow: Science (Russian), 1977.
26. Smirnov. V.V. Organic Weight in Some Wood Phytocoenosis of the European Part of the USSR. Moscow: Science (Russian), 1971.
27. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. A Humus and Soil Formation (Methods and Results of Studying). Leningrad: Science (Russian), 1980.
28. Kostina N.V., Rozenberg G.S., Shitikov V.K. Expert system of ecological condition of basin of the large river // Proceedings of the Samara Scientific Centre of the RAS (Russian). 2003. V. 5, No. 2. P. 287-294.
29. Kostina N.V. REGION: Expert System of Condition and Management of Bioresources. Togliatti: Samara Scientific Centre of the RAS (Russian), 2005.
30. Liepa I.Ya. An indicator of relative density of influence of factors of influence // Scientific Notes of the Latvian University. Riga: Publ. Latv. Univ., 1971. P. 36-40.
31. Bitvinskis T. Dendroclimatic Researches. Leningrad: Gidrometeoizdat (Russian), 1974.
32. Kostina N.V. Status Analysis and Scenario Development of Socio-Ecological-Economic Systems of Territories of Different Scales with Expert Information System of the REGION. Togliatti: Cassandra, 2015.

Information about the authors

Gennady S. Rozenberg, corresponding member of Russian Academy of Science, doctor of biological science, professor, director of the Institute of Ecology of Volga Basin of Russian Academy of Science, Samara Region, Togliatti, Komzina str. 10, 445003, Russian Federation, E-mail: genarozenberg@yandex.ru
Natalia V. Kostina, candidate of biological science, senior scientific collaborator of the Institute of Ecology of Volga Basin of Russian Academy of Science, E-mail: knva2009@yandex.ru
Razina S. Kuznetsova, candidate of biological science, scientific collaborator of the Institute of Ecology of Volga Basin of Russian Academy of Science, E-mail: ievbras2005@mail.ru
Sergey V. Saxonov, doctor of biological science, professor, deputy director of the Institute of Ecology of Volga Basin of Russian Academy of Science, E-mail: svsaxonoff@yandex.ru