# Влияние климатических изменений на продуктивность растительного покрова Европейской России

*Л.Л. Голубятников, к.ф.-м.н.*
*Е.А. Денисенко, к.г.н.*
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

Отличительной чертой современного потепления климата является его беспрецедентная скорость. Среднегодовая глобальная приземная температура за XX столетие увеличилась приблизительно на 0,6°С, причем около половины этого векового потепления пришлось на последнее десятилетие. За период инструментальных наблюдений десять глобально наиболее теплых лет были отмечены в течение последних двух десятилетий. При этом со второй половины 1980-х гг. диапазон изменения аномалии глобальной среднегодовой температуры воздуха значительно увеличился по сравнению с данными за первую половину XX в. [1]. Согласно палеоклиматическим данным скорость роста температуры Северного полушария в течение прошедшего столетия была значительно больше, чем характерные скорости ее изменения за последние два тысячелетия [2].

Анализ метеорологических данных XX столетия показал, что на территории Европейской России наблюдались слабый тренд повышения приземной температуры и слабая тенденция роста осадков. Потепление глобального климата на этой территории наиболее ярко проявилось в диапазоне широт от 50°с.ш. до 55°с.ш., где наблюдались рост осадков в летний период и повышение среднегодовой температуры воздуха на 1°С преимущественно за счет зимних температур [3].

Неоднородность изменений климата предопределяет сложную и неоднозначную реакцию на эти изменения растительного покрова. Тенденция потепления может вызвать серьезные изменения в видовом составе и сезонной динамике наземных экосистем. Под воздействием повышения глобальной приповерхностной температуры, изменения количества осадков, увеличения продолжительности периода со среднесуточ-

ной температурой воздуха не ниже 10°С и других климатических изменений может произойти деградация и фрагментация ареалов произрастания многих видов растений с возникновением новых условий существования для отдельных растительных сообществ и экосистем [4].

Возможные изменения в растительном покрове имеют ряд важных последствий как для различных сторон жизнедеятельности человека, так и для непосредственно климатической системы. Оценка реакции продукционных процессов растительности на возможные глобальные изменения климата стала особенно актуальной в силу того, что физиологические процессы, характерные для растительного покрова, могут сдерживать рост концентрации углекислого газа в атмосфере и оказывают существенное влияние на величину суммарного обменного потока углерода в наземных экосистемах [5].

Современные исследования реакции растительного покрова наземных экосистем на изменения климата в основном касаются анализа изменений пространственного распределения ареалов типов растительности (*биомов*), оценки динамики границ растительных зон. В частности, в некоторых работах используется подход, основанный на описании динамики растительного сообщества через реакцию отдельных особей – так называемые гэп-модели [6, 7]. В моделях этого типа детально описываются биологические особенности роста растений, конкурентные взаимоотношения между ними и взаимосвязь растительного покрова с климатическими характеристиками. Эти модели преимущественно используются для анализа динамики лесных биомов. Подробное описание в моделях этого типа физиологических и экологических закономерностей требует знания большого объема количественных, эмпирически определяемых данных о характеристиках изучаемых процессов, что делает достаточно проблематичным использование этих моделей для глобальных оценок изменений одновременно в нескольких биомах.

Другой широко распространенный подход к исследованию реакции растительности на климатические изменения базируется на *биоклиматических схемах*, т.е. экспериментально установленных взаимосвязях характеристик растительного покрова с теми или иными климатическими параметрами или их комбинацией. Среди наиболее часто используемых в моделях биоклиматических схем можно выделить схемы Холдриджа [8], Григорьева–Будыко [9], Лита [10]. В схеме Холдриджа разные биомы разделены по режимам таких климатических характеристик, как средняя за год биотемпература, среднегодовое количество осадков и коэффициент потенциального испарения. Схема Григорьева–Будыко связывает географическое распределение основных типов растительности с радиационным балансом поверхности и радиационным индексом сухости. Схема Лита определяет границы основных биомов суши в зависимости от среднегодовой температуры воздуха и количества осадков за год. В работах, которые основаны на биоклиматических схемах, учитывающих связь границ биомов с климатическими характеристиками, получены оценки потенциальных территорий, занимаемых тем или иным биомом при различных сценариях климатических изменений [11]. В этих исследованиях предполагается, что трансформация растительных зон происходит мгновенно при изменении климатических условий, т.е. не учитывается, что реальные сдвиги растительных сообществ (*фитоценозов*), вызываемые глобальными и региональными изменениями климата, происходят в результате длительных (в десятки и сотни лет) процессов, называемых сукцессиями.

В некоторых работах предпринята попытка учесть продолжительность замены одного биома другим при выходе первого из свойственного ему диапазона климатических условий. Например, оценивается динамика растительных биомов на основе биоклиматической схемы Холдриджа, дополненной процедурой перехода от одного биома к другому [12]. При этом на основе ряда гипотез учитываются вероятные временные периоды, необходимые для переходных процессов между рассматриваемыми типами растительности. Однако при таком подходе результат моделирования существенно зависит от конкретного вида процедуры временной задержки, который может иметь различную формализацию при выборе той или иной интерпретации смены растительности в изменяющихся условиях.

Анализ реакции глобального распределения растительности на климатические изменения возможен на основе динамических моделей. Например, разработанная под руководством проф. Ю.М.Свирежева оригинальная модель динамики глобального распределения растительности [13, 14] позволяет определить для заданного климатического сценария распределение площадей, занимаемых каждым из рассматриваемых биомов в любой момент времени, а также оценить продолжительность достижения этими биомами равновесного состояния.

Для получения оценок влияния изменения климатических параметров на ход восстановления растительности используется моделирование процесса сукцессий, т.е. процесса смены растительных сообществ в пространстве и во времени. Для макроописания динамики растительных сообществ в этих моделях используется математический формализм конечных цепей Маркова. В новом типе марковских моделей сукцессии, предложенном проф. Д.О.Логофетом [15, 16], вероятности переходов между состояниями процесса не постоянны и зависят от изменений ключевых факторов среды, определяющих динамику растительности, таких как, например, увлажнение, температурный режим. В неоднородной модели можно учесть реальные данные о влиянии основных характеристик среды на скорость сукцессионных процессов. Модели этого типа на основе обобщения совокупности имеющихся данных и экспертных знаний по конкретной территории позволяют получать достаточно реалистичные эколо-

гические оценки динамики растительных сообществ в разных регионах.

Отмеченные подходы к исследованию реакции растительности на климатические изменения основаны на использовании качественных характеристик растительного покрова. Для более глубокого понимания возможных изменений интенсивности многообразных продукционных и деструкционных процессов в экосистемах при возможных изменениях климата необходим их количественный анализ.

Одна из количественных характеристик продуктивности фитоценозов – их *первичная биологическая продукция.* Эта величина является показателем интенсивности процесса аккумуляции и депонирования углерода растительным покровом и определяется количеством органического вещества, накапливающимся за определенный интервал времени (обычно это год) на единице площади во всей надземной и подземной сфере растительного сообщества. Наряду с термином «первичная биологическая продукция» используются также эквивалентные понятия «биологическая продуктивность», «первичная продуктивность», «годичный прирост», «годичная нетто-продукция» растительного покрова.

Попытки учесть взаимодействие климатических изменений и продукционных процессов растительного покрова предпринимались в ряде работ, в которых анализировались возможные изменения агроклиматических условий и урожайности основных сельскохозяйственных культур в разных географических регионах для ряда сценариев изменения климата [17–19].

Оценки изменений биологической продуктивности наземной растительности возможны на основе биосферных и экосистемных моделей. Примерами применения этого класса моделей для указанной цели служат работы зарубежных ученых [20, 21]. В первой из них на основе экосистемной модели CENTURY получена оценка возможных изменений первичной биологической продукции бореальных лесов центральной части Канады при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере с использованием климатической модели общей циркуляции атмосферы GISS. Во второй работе приведены результаты расчета биологической продуктивности сосновых лесов на юго-востоке Франции, полученные с помощью биосферной модели BIOME3 для четырех сценариев климатических изменений с использованием модели общей циркуляции атмосферы ARPEGE. Следует отметить, что применение биосферных и экосистемных моделей для оценки возможных изменений продуктивности имеет ряд проблем, связанных с идентификацией некоторых характеристик этих моделей для разных фитоценозов.

Результаты расчетов годовых оценок первичной биологической продукции растительного покрова с использованием нескольких биоклиматических и экофизиологических моделей проанализированы авторами этой статьи ранее [22]. Первую группу составляют модели, в которых используются эмпирически установленные соотношения среднегодовых значений климатических параметров с величинами продуктивности. В основу экофизиологических моделей положено описание сложных взаимосвязей процессов переноса органического вещества в экосистемах. Первичная биологическая продукция в этих моделях зависит от ряда процессов, таких как фотосинтез и дыхание растительности, испарение, отмирание и разложение органического вещества, т.е. от большого количества физиологических параметров и характеристик окружающей среды. В проведенном исследовании отмечено, что результаты, рассчитанные с помощью экофизиологических моделей, сравнимы с оценками, полученными при применении биоклиматических моделей. Для значений первичной биологической продукции, рассчитанных с помощью экофизиологических моделей, получен больший диапазон вариаций, чем для значений, полученных с использованием биоклиматических моделей (см. таблицу). Проведенный анализ свидетельствует, что достаточно простые модели, основанные на биоклиматических зависимостях, можно использовать для выявления возможных изменений годовых величин продуктивности растительного покрова.

Полученные с помощью моделей, различной степени детальности описания процессов и разного пространственно-временного разрешения, оценки влияния климатических изменений на продуктивность растительных сообществ достаточно разнообразны. Это свидетельствует о значительной неопределенности существующих оценок возможных изменений в растительном покрове подстилающей поверхности суши. По этой причине для многостороннего анализа вероятного отклика наземной растительности на изменение климата необходим широкий спектр различных моделей, возможных сценариев и методов диагностики.

В данной работе для оценки отклика продуктивности растительного покрова на возможные изменения климата мы используем результаты численных экспериментов с климатическими моделями общей циркуляции атмосферы: CCC – Канадского климатического центра, GFHI – Принстонской геофизической лаборатории динамики жидкости (США) и UKHI – Метеорологического центра Великобритании [23]. Нами рассмотрен сценарий изменения климата для нового его равновесного состояния при удвоенной концентрации углекислого газа в атмосфере.

Согласно полученным с помощью моделей CCC, GFHI, UKHI прогнозов климатических изменений, на территории Европейской России ожидается значительное повышение температур воздуха в зимний период, особенно в районах, расположенных на широтах выше 65°с.ш. (более чем на 5°С).Предполагается повышение летних температур на 2–4°С. Для рассматриваемой территории будет характерно увеличение осадков в течение всего года, особенно в зимний период. Исключение составят регионы, расположенные южнее 50°с.ш., в которых прогнозируется некоторое уменьшение летних осадков.

***Отклонение модельных значений первичной биологической продукции растительности от эмпирических данных для природных зон территории Европейской России, %***

| *Модели* | *Тундра* | *Хвойные леса* | *Смешанные леса* | *Широколиственные леса* | *Луговая степь* | *Настоящая степь* | *Полупустыня* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Экофизиологические** | | | | | | | |
| CASA (Carnegie Ames Stanford Approach model) | 38 | 17 | 42 | 44 | 59 | 48 | 65 |
| CENTURY (General ecosystem level model) | 127 | 121 | 67 | 18 | 61 | 58 | 56 |
| TSUBIMO (Tsukuba Biosphere Model) | 0 | 20 | 4 | 8 | 31 | 11 | 69 |
| TEM (Terrestrial Ecosytem Model) | 4 | 28 | 43 | 21 | 42 | 48 | 50 |
| FBM (Frankfurt Biosphere model) | 95 | 21 | 14 | 2 | 31 | 6 | 14 |
| SILVAN (Simulating Land Vegetation And NPP model) | 137 | 63 | 23 | 5 | 27 | 0 | 20 |
| **Биоклиматические** | | | | | | | |
| MIAMI model | 103 | 12 | 17 | 26 | 46 | 13 | 6 |
| Модель Ефимовой | 33 | 11 | 17 | 13 | 56 | 35 | 16 |
| Модель Зубенок | 61 | 7 | 4 | 8 | 45 | 4 | 30 |
| Модель ЛМЭ | 3 | 1 | 9 | 14 | 32 | 13 | 9 |

Отклик первичной биологической продукции растительного покрова Европейской России на климатические изменения был оценен нами с помощью модели, разработанной в Лаборатории математической экологии ИФА РАН (*модель ЛМЭ*). Ее основой является биоклиматическая схема, в которой значения биологической продуктивности растительных сообществ определяются по величинам радиационного баланса поверхности и суммарного испарения. Для построения схемы были получены функциональные зависимости годичной продуктивности фитоценозов от указанных климатических характеристик для территории Европейской России на основе эмпирических значений для первичной биологической продукции фитоценозов Северной Евразии [24], данных для радиационного баланса [25] и суммарного испарения [26]. Полученные зависимости позволили на основе метода кусочно-кубической интерполяции представить биологическую продуктивность в виде непрерывной функции от значений радиационного баланса и суммарного испарения. Эта зависимость для территории Европейской России приведена на рис. 1. Отклонения модельных значений продуктивности, полученные по модели ЛМЭ, от эмпирических данных для природных зон приведены в таблице.

В нашей работе мы воспользовались оценками изменений суммарного испарения для сценариев климатических изменений ССС, GFHI, UKHI, которые приведены в работе О.Е.Бусаровой и Е.М.Гусева [27]. Согласно результатам этих авторов можно выделить общий характер распределения изменений суммарного испарения на территории Европейской России. Наибольшее увеличение суммарного испарения ожидается на северо-западе: по сценариям GFHI и UKHI – на 80–100 мм/год, а по сценарию ССС – на 60–90 мм/год. При движении с северо-запада на юго-восток величина прироста суммарного испарения будет уменьшаться. Ожидается, что на широтах южнее 50°с.ш. величины суммарного испарения возрастут слабо (не более чем на 50 мм/год). По климатическому сценарию ССС в районах Нижнего Поволжья и Северного Кавказа величина суммарного испарения может уменьшиться более чем на 50 мм/год.

Для расчета значений первичной биологической продукции по составленной биоклиматической схеме мы использовали связь температурного режима (годовой суммы среднесуточных значений приповерхностной температуры воздуха не ниже 10°С – $T_\Sigma$) и радиационного баланса поверхности. Зависимость между этими величинами для территории Европейской России была проанализирована на пространственной сетке с разрешением 0,5°×0,5° географической широты и долготы на основе Атласа мира [25]. Проведенный анализ показал, что при изменении $T_\Sigma$ от 0 до 600°С величина радиационного баланса увеличивается незначительно – с 0,7 до 0,75 ГДж/м$^2$ в год, при изменении $T_\Sigma$ до 2900°С – от 0,8 до 1,7 ГДж/м$^2$ в год, а при изменении $T_\Sigma$ от 2900 до 3100 °С наблюдается резкий рост значений радиационного баланса – от 1,7 до 2,1 ГДж/м$^2$ в год.

Дальнейшее увеличение $T_{\Sigma}$ слабо влияет на изменение величины радиационного баланса: его значения остаются практически постоянными, приблизительно равными 2,0 ГДж/м$^2$ в год. Отмеченная зависимость может быть использована для оценок возможного изменения радиационного баланса по изменениям приземной температуры и наоборот.

Расчеты показали, что при климатических сценариях CCC, GFHI, UKHI происходит увеличение радиационного баланса на всей территории Европейской России за исключением Северного Кавказа, где ожидается незначительное снижение его уровня приблизительно на 0,1 ГДж/м$^2$ в год. Существенное повышение значений радиационного баланса на 0,5–0,9 ГДж/м$^2$ в год предполагается на северо-западе рассматриваемой территории. Ожидается, что значительно (на 0,3–0,7 ГДж/м$^2$ в год) возрастут его величины в районах, расположенных на широтах между 66° и 52° с.ш.

Широтное распределение величин продуктивности по эмпирическим данным второй половины XX в. для территории Европейской России приведено на рис. 2. Согласно этим данным наибольшие значения продуктивность растительного покрова имеет в поясе широт 52–54°с.ш. К северу от этого диапазона (около 59°с.ш.) проявляется дополнительный максимум значений первичной биологической продукции. В поясе широт от 59 до 62°с.ш. происходит резкое уменьшение величины годовой продуктивности – с 12 до 5 т/га. Далее к северу уменьшение значений этой величины с ростом широты более плавное. В поясе широт от 52°с.ш. до 45°с.ш. осредненные по широтам значения продуктивности для территории Европейской России по эмпирическим данным – не менее 10 т/га в год.

Наряду с эмпирическими данными на рис. 2 представлены оценки возможных значений продуктивности растительного покрова на территории Европейской России при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере, полученные с использованием климатических сценариев моделей CCC, GFHI, UKHI. Наибольшие значения первичной биологической продукции получены по климатическому сценарию GFHI. Следует отметить, что согласно этому сценарию значения продуктивности в диапазоне широт 45–49°с.ш. и 55–70°с.ш. превосходят эмпирические значения для второй половины XX в.

Существенные изменения продуктивности растительного покрова на территории Европейской России получены севернее примерно 49° с.ш. При этом согласно климатическим сценариям GFHI, CCC для широтного диапазона 55°–66°с.ш. характерен значительный рост значений продуктивности при потеплении. Близкие оценки получены с использованием климатического сценария UKHI, только с заметно более слабыми изменениями продукции в узком диапазоне широт – от 56°с.ш. до 59°с.ш. В поясе широт от 49°с.ш. до 55°с.ш. для всех проанализированных климатических сценариев возможно уменьшение значений продуктивности по сравнению с данными наблюдений второй половины XX в. Прирост первичной биологической продукции в регионе к югу от 52° с.ш. возможен согласно климатическим сценариям GFHI и UKHI, в то время как по сценарию CCC значения продукции уменьшаются по сравнению с эмпирическими данными для второй половины XX в.

Согласно сделанным оценкам с использованием рассматриваемых модельных сценариев глобального потепления для территории Европейской России можно ожидать заметного увеличения первичной биологической продукции в достаточно протяженном поясе широт от 70°с.ш. до примерно 57°с.ш. В то же время следует отметить, что для рассматриваемой территории отмечены изменения значений продуктивности разного знака: в диапазоне широт 59°–49°с.ш. при климатических сценариях всех трех рассмотренных моделей CCC, GFHI, UKHI получено снижение величины годовой продуктивности растительного покрова.

Возможные изменения величин первичной биологической продукции растительного покрова при климатических изменениях, связанных с удвоением концентрации углекислого газа в атмосфере, согласно моделям CCC, GFHI, UKHI представлены на рис. 3. Расчеты показывают, что для этих трех сценариев можно выделить общий характер распределения реакции первичной биологической продукции. Все рассмотренные сценарии дают увеличение этой характеристики растительного покрова в северных районах Европейской России в среднем на 2 т/га в год. Наибольшее увеличение (более чем на 4 т/га в год) ожидается в обширном районе от южного побережья Белого моря и бассейна Северной Двины на севере до верхнего течения Камы на востоке. Понижение продуктивности растительного покрова на 1–5 т/га в год ожидается в регионе, расположенном южнее Онежского и Ладожского озер. В районах верхнего и среднего течения Дона на юго-западе, среднего течения Волги, нижнего течения рек Камы и Самары на востоке прогнозируется значительное понижение величины годовой первичной биологической продукции на 2–8 т/га.

Общие тенденции в изменении ежегодного прироста растительности прослеживаются по всем трем сценариям, но вместе с тем по каждому их них можно выделить свои особенности в распределении изменений биологической продуктивности. По сценарию CCC выделяются районы нижнего Поволжья и Северного Кавказа, в которых продуктивность может уменьшиться на 30–35% от современного, в то время как сценарии UKHI и GFHI дают для этих районов малую изменчивость значений первичной биологической продукции всего на 7–9%. Согласно сценариям CCC и GFHI выделяется область на западе Центрального

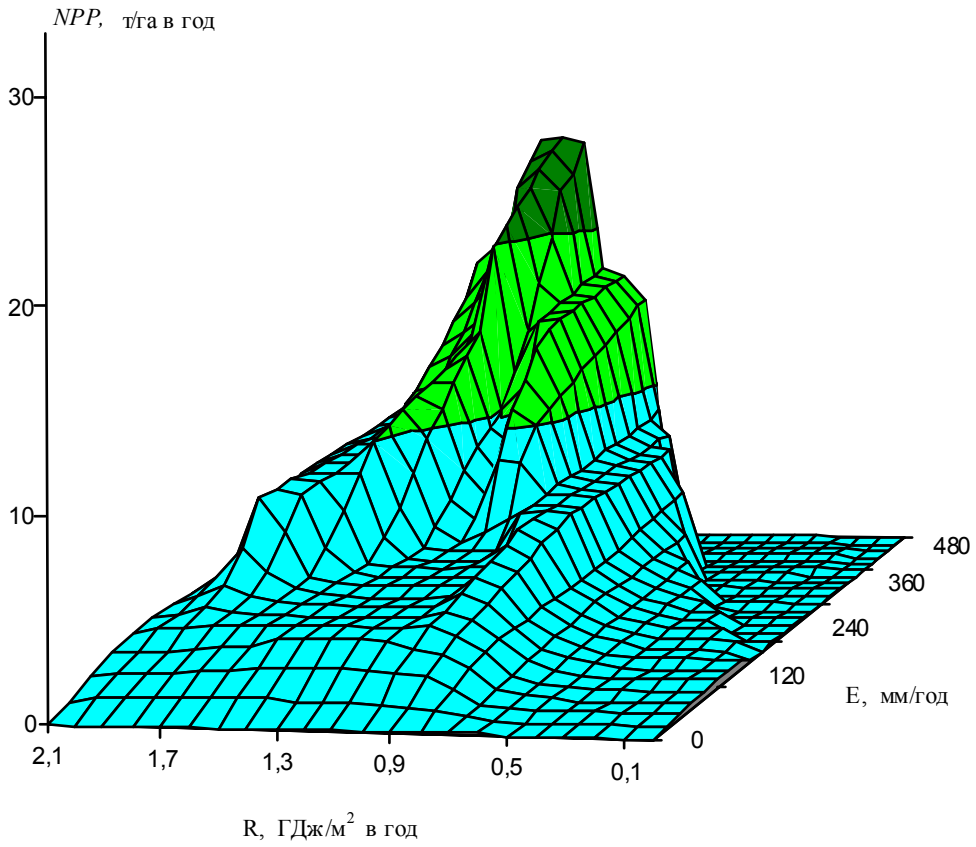


Рис. 1. Зависимость значений первичной биологической продукции (*NPP*) от радиационного баланса поверхности (*R*) и суммарного испарения (*E*) для территории Европейской России

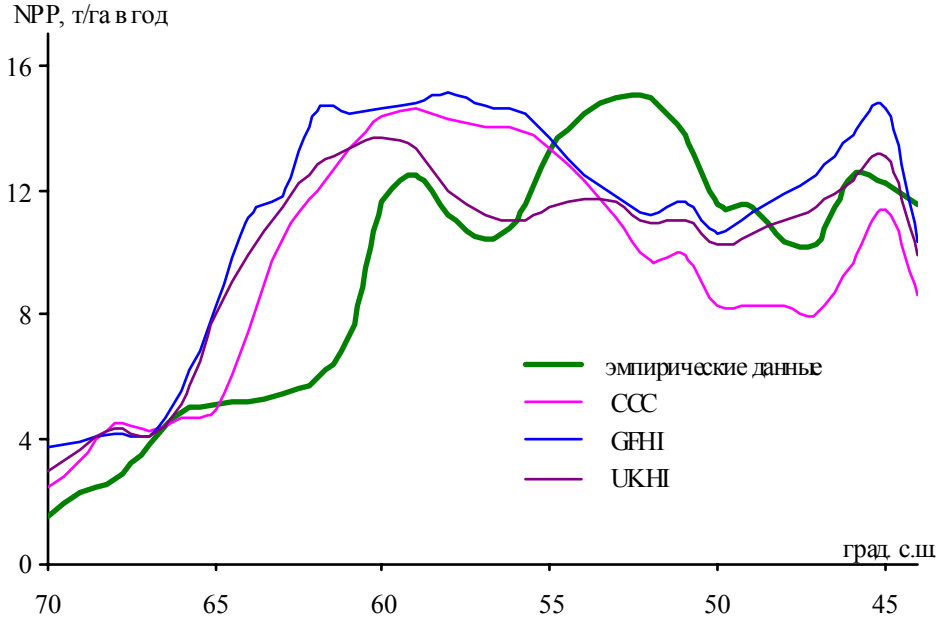


Рис. 2. Широтные распределения величин первичной биологической продукции (*NPP*) растительного покрова согласно эмпирическим данным для второй половины XX в. [24] и полученные с использованием климатических сценариев CCC, GFHI, UKHI для территории Европейской России

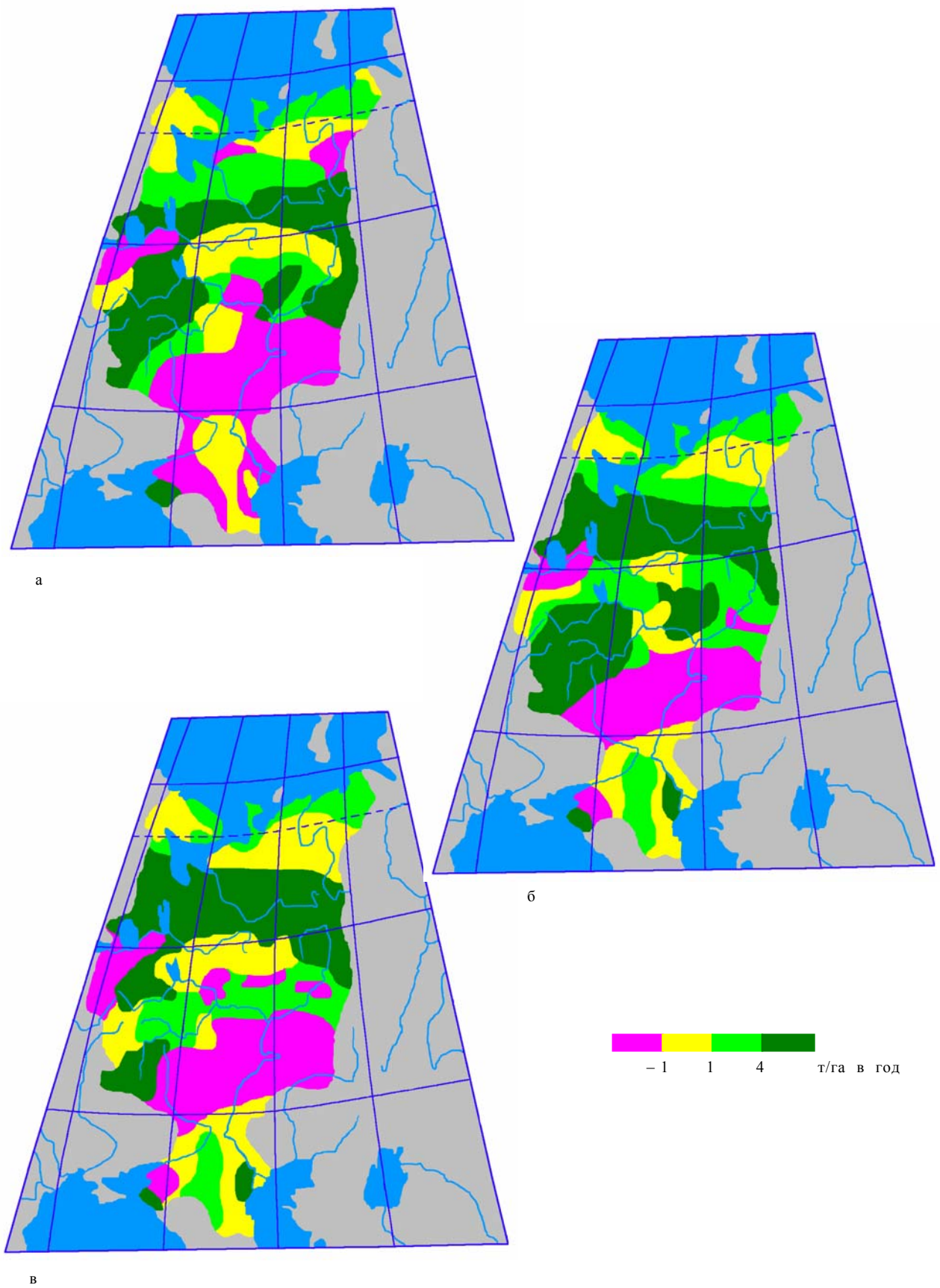


Рис. 3. Изменения значений первичной биологической продукции при климатических изменениях, связанных с удвоением концентрации углекислого газа в атмосфере согласно моделям CCC (а), GFHI (б), UKHI (в)

района территории Европейской России, где прогнозируется значительное повышение первичной продуктивности – на 27–40%. По сценарию UKHI рост продуктивности в этой области будет менее значительным – на 10–25%.

Согласно полученным оценкам, пространственные распределения изменений первичной биологической продукции растительного покрова на территории Европейской России по климатическим сценариям CCC, GFHI, UKHI достаточно близки. Результаты модельных расчетов указывают на возможные тенденции изменения значений продуктивности для нового равновесного состояния климата при удвоенной концентрации углекислого газа в атмосфере.

## *Литература*


1. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001.
2. *Mann M.E., Jones P.D.* Global surface temperatures over the past two millennia // Geophys. Res. Lett. 2003. V.30. №15. P.1820–1823.
3. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Изменение климатических условий европейской части России // Влияние изменения климата на экосистемы. – М.: Рус. ун-т, 2001. С. I.9–I.16.
4. *Кожаринов А.В., Минин А.А.* Современные тенденции в состоянии природы Русской равнины // Влияние изменения климата на экосистемы. – М.: Рус. ун-т, 2001. С. I.17–I.23.
5. *Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Svirezhev Yu.M.* Model of the total exchange carbon flux for terrestrial ecosystems // Ecol. Modelling. 1998. V. 108. P. 265-276.
6. *Bugmann H.* An efficient method for estimating the steady-state species composition of forest gap models // Can. J. For.Res. 1997. V. 27. P. 551-556.
7. *Jiang H., Peng C., Apps M.J., Zhang Y., Woodard P.M., Wang Z.* Modeling the net primary productivity of temperate forest ecosystems in China with a GAP model // Ecol. Modelling. 1999. V. 122. P. 255-238.
8. *Holdridge L.R.* Detrermination of world plant formation from simple climate data // Science. 1947. V. 105. P. 367–368.
9. *Будыко М.И.* Глобальная экология. – М.: Мысль. 1977.
10. *Lieth H.* Modeling the primary productivity of the world // Lieth H., Whittaker R.H. (eds) Primary productivity of the biosphere. – New York: Springer-Verlag, 1975. P. 237–262.
11. *Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Турчинович И.Е.* Влияние изменений климата на природную зональность и экосистемы России // Изменения климата и их последствия. С.-Пб.: Наука, 2002. С. 205–210.
12. *Belotelov N., Bogatyrev B., Kirilenko A., Venevsky S.* Modelling of time-dependent biome shifts under global climate changes // Ecol. Modelling. 1996. V. 87. P. 29–40.
13. *Svirezhev Yu.M.* Simplest dynamic models of the global vegetation pattern // Ecol. Modelling. 1999. V. 124. P. 131–144.
14. *Svirezhev Yu.M., Zavalishin N.N.* «Forest-grass» global vegetation model with forest age structure // Ecol. Modelling. 2003. V. 160. P. 1–12.
15. *Логофет Д.О., Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Неоднородные марковские модели сукцессии растительности: новые перспективы старой парадигмы // Изв. РАН. Сер. биол. 1997. №5. С. 613–622.
16. *Korotkov V.N., Logofet D.O., Loreau M.* Succession in mixed boreal forest of Russia: Markov models and non-Markov effects // Ecol. Modelling. 2001. V. 142. P. 25–38.
17. *Бровкин В.А., Денисенко Е.А.* Реакция урожайности яровых культур на возможные изменения климата на территории бывшего СССР (модельный подход) // Изв. РАН. Сер. геогр. 1993. №4. С. 51–59.
18. *Израэль Ю.А., Сиротенко О.Д.* Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. 2003. №6. С. 5–17.
19. *Tan G., Shibasaki R.* Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration // Ecol. Modelling. 2003. V. 168. P. 357–370.
20. *Peng C., Apps M.J.* Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to change in climate and fire disturbance regimes // Ecol. Modelling. 1999. V. 122. P. 175–193.
21. *Rathgeber C., Nicault A., Kaplan J.O., Guiot J.* Using a biogechemistry model in simulating forests productivity responses to climatic change and $CO_2$ increase: example of Pinus halepensis in Provence (south-east France) // Ecol. Modelling. 2003. V. 166. P. 239–255.
22. *Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Моделирование значений первичной биологической продукции для зональной растительности Европейской России // Изв. РАН. Сер. биол. 2001. №3. С. 353–361
23. Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990. 365 p.
24. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука. 1993. 293 с.
25. Физико-географический атлас мира. – М.: ГУГК, 1964.
26. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – М.–Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
27. *Бусарова О.Е., Гусев Е.М.* Использование результатов моделирования изменения климата для оценки изменений суммарного испарения на территории Европы // Метеорология и гидрология. 1995. №10. С. 29–34.