ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ, 2007, № 2, с. 212–228

ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.589:519.24:581.9(470:251)

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АРЕАЛЫ ЗОНАЛЬНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ РАВНИННЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

© 2007 г. Л. Л. Голубятников, Е. А. Денисенко

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер., 3
E-mail: golub@ifaran.ru

Поступила в редакцию 01.12.2005 г.

Сделаны оценки возможных изменений ареалов зональных фитоценозов потенциальной растительности равнинных территорий России в связи с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С согласно моделям общей циркуляции атмосферы и океана ECHAM4/OPYC3 и HadCM3 и климатической модели промежуточной сложности Института физики атмосферы РАН для антропогенных сценариев изменения содержания парниковых газов в атмосфере. Для оценки отклика ареалов фитоценозов на возможные изменения климата использованы данные об изменениях значений первичной биологической продукции фитоценозов при рассматриваемых климатических сценариях. На основе полученных результатов выделены зональные фитоценозы, наиболее чувствительные к изменению климата.

Структура и функционирование растительного покрова определяются многими факторами (климатическими, биотическими, эдафическими, орографическими, историческими и т.п.). Однако влияние климата на развитие растительности настолько велико, что до определенных пределов оно может подчинять себе влияние других факторов. Вследствие этого, растительность в основных своих чертах при определенных климатических условиях остается неизменной, несмотря на мозаичный состав геологического сложения территории (Курнаев, 1973).

В высоких широтах Северного полушария, где расположена большая часть территории России, в настоящее время происходят значительные изменения климата. Среднегодовая глобальная приземная температура за XX в. увеличилась приблизительно на 0.6°С, в то время как на территории России потепление климата за прошлое столетие составило 0.9°С (Climate …, 2001). Анализ палеоклиматических данных показал, что скорость роста температуры Северного полушария в течение прошедшего столетия значительно больше, чем характерные скорости ее изменения за последние два тысячелетия (Mann, Jones, 2003). Данные указывают на то, что современное изменение климата имеет сложную региональную структуру. Выявлена существенная пространственная неоднородность трендов приземной температуры. В пределах России наиболее сильный тренд ее среднегодовых значений отмечен на территориях Средней Сибири, Прибайкалья, Забайкалья, Приамурья и Приморья. Потепление было более заметно в зимний и весенний сезоны – соответственно на 4.7°С и на 2.9°С за сто лет. Во второй половине XX в. годовые и сезонные (кроме зимних) осадки в целом для России уменьшались (Груза, Ранькова, 2002). Наиболее заметное уменьшение осадков отмечено для Северо-Восточного региона России, тогда как для территории ее Европейской части получена слабая тенденция роста осадков.

Неоднородность изменений климата предопределяет сложную и неоднозначную реакцию на эти изменения наземной растительности. Тенденция повышения температуры и изменения осадков может вызвать серьезные изменения в структуре и видовом составе растительного покрова. Климатические изменения могут существенно отразиться на сроках сезонного развития растительности. Под воздействием повышения глобальной приземной температуры, изменения количества осадков, увеличения продолжительности безморозного периода и других климатических характеристик может произойти сокращение и фрагментация ареалов многих видов растений с возникновением новых условий существования для отдельных растительных сообществ и экосистем (Кожаринов, Минин, 2001; Root *et al.*, 2003).

В настоящей работе для равнинных территорий России сделаны оценки возможных изменений ареалов зональных фитоценозов потенциальной растительности при глобальном среднегодовом потеплении климата в первой половине XXI в., выделены зональные фитоценозы, наиболее чувствительные к изменению климата.

Ареалы растительности и климат. Проанализировать принципиальные различия между ареалами различных фитоценозов, сравнить

адаптацию фитоценозов к тем или иным климатическим условиям можно с помощью их фитоклиматических ареалов (климаареалов). Климаареал – это графическое изображение области произрастания растительного сообщества в координатах тех или иных климатических факторов. Примером климаареалов фитоценозов на региональном уровне служит схема Гребенщикова (1986), в которой ареалы природных фитоценозов Европейской территории бывшего СССР представлены в координатных осях годового количества осадков и годовых сумм температур выше 10°С (рис. 1а). Эта схема позволяет провести сравнительный анализ адаптаций разных фитоценозов к режиму тепла и влаги. Почти все ареалы лесных фитоценозов занимают термическое пространство в пределах сумм температур от 1500 до 3000°С, а по показателям годового количества осадков – от 500 до 800 мм. В умеренных широтах к этому пространству приурочен оптимум существования большей части растительных сообществ, что отражается в частом взаимном наложении и перекрытии контуров их климатических ареалов. Ниже указанной группы климаареалов расположены ареалы фитоценозов, адаптированных к крайним условиям существования: предельно холодным (тундры, лесотундры), холодным и избыточно влажным (например, горные тундры Хибин), переувлажненным при умеренном терморежиме (например, темнохвойные леса Карпат). Верхнюю часть схемы занимают фитоценозы, произрастающие в более сухих условиях: различные типы степей, полупустынь, пустынь и сухих лесов суббореального типа, например, можжевелово-фисташково-дубовые леса и редколесья южного Крыма. Следует отметить, что вытянутость контуров климаареалов в определенном направлении не зависит от территории, занятой соответствующим растительным сообществом. Наиболее узкие диапазоны существования по отношению к теплу и влаге имеют сухие степи и полупустыни. На обширной территории Русской равнины зональные изменения климатических условий и пространственные смены фитоценозов происходят постепенно. Расположение ареалов фитоценозов на этой территории часто определяется не только климатическими условиями, но и особенностями почвообразующих, подстилающих пород и рельефа (Гребенщиков, 1986). Это отражается в перекрытии климаареалов рассматриваемых растительных сообществ в заданных координатах климатических характеристик.

На глобальном уровне климаареалы многих растительных сообществ также перекрывают друг друга. Примером фитоклиматических ареалов наземной растительности на глобальном уровне является схема Волобуева (1947). Эта схема отражает закономерности размещения основных типов наземной растительности в связи с изменениями тепла и влажности (рис. 1б). Большая часть ареалов степных и пустынных фитоценозов занимает область в пределах от 12°С до 18°С среднегодовой температуры при годовых осадках до 650 мм. Ареалы лесных фитоценозов умеренного пояса расположены в пределах примерно от –8°С до 12°С среднегодовой температуры при годовых осадках от 300 до 1000 мм. Ареалы субтропических и тропических фитоценозов преимущественно занимают пространство в пределах от 12°С до 28°С среднегодовой температуры при осадках свыше 500 мм в год.

Таким образом, фитоклиматические ареалы растительных сообществ позволяют определить диапазоны изменения климатических параметров, в которых произрастают отдельные фитоценозы или типы растительности. Следует отметить, что из-за перекрытия климаареалов разных фитоценозов соотношение "ареал фитоценоза – климатические характеристики" не является взаимооднозначным.

Моделирование реакции растительности на климатические изменения. Один из распространенных подходов к анализу изменений пространственного распределения ареалов типов растительности на климатические изменения основан на использовании биоклиматических схем, т.е. экспериментально установленных взаимосвязях характеристик наземной растительности с теми или иными климатическими параметрами или их комбинацией. Среди наиболее часто используемых в моделях биоклиматических схем можно выделить схемы Холдриджа (Holdridge, 1967), Лита (Lieth, 1975) и Григорьева–Будыко (Будыко, 1977). На схеме Холдриджа разные растительные сообщества разделены по режимам таких климатических характеристик, как среднегодовая температура, годовое количество осадков и коэффициент потенциального испарения. Схема Лита определяет границы основных типов растительности от среднегодовой температуры и количества осадков за год. Схема Григорьева–Будыко связывает географическое распределение основных типов растительности с радиационным балансом поверхности и радиационным индексом сухости. В работах, основанных на биоклиматических схемах, учитывающих связь границ растительных сообществ с климатическими характеристиками, получены оценки площадей территорий, занимаемых тем или иным растительным сообществом при различных сценариях климатических изменений (Белотелов и др., 1995; Кобак и др., 2002). Как правило, в этих исследованиях предполагается, что трансформация растительных зон происходит мгновенно при изменении климатических условий, т.е. не учитывается, что реальные сдвиги ареалов фитоценозов, вызываемые глобальными и региональными изменениями климата, происходят в процессе сукцессий, а

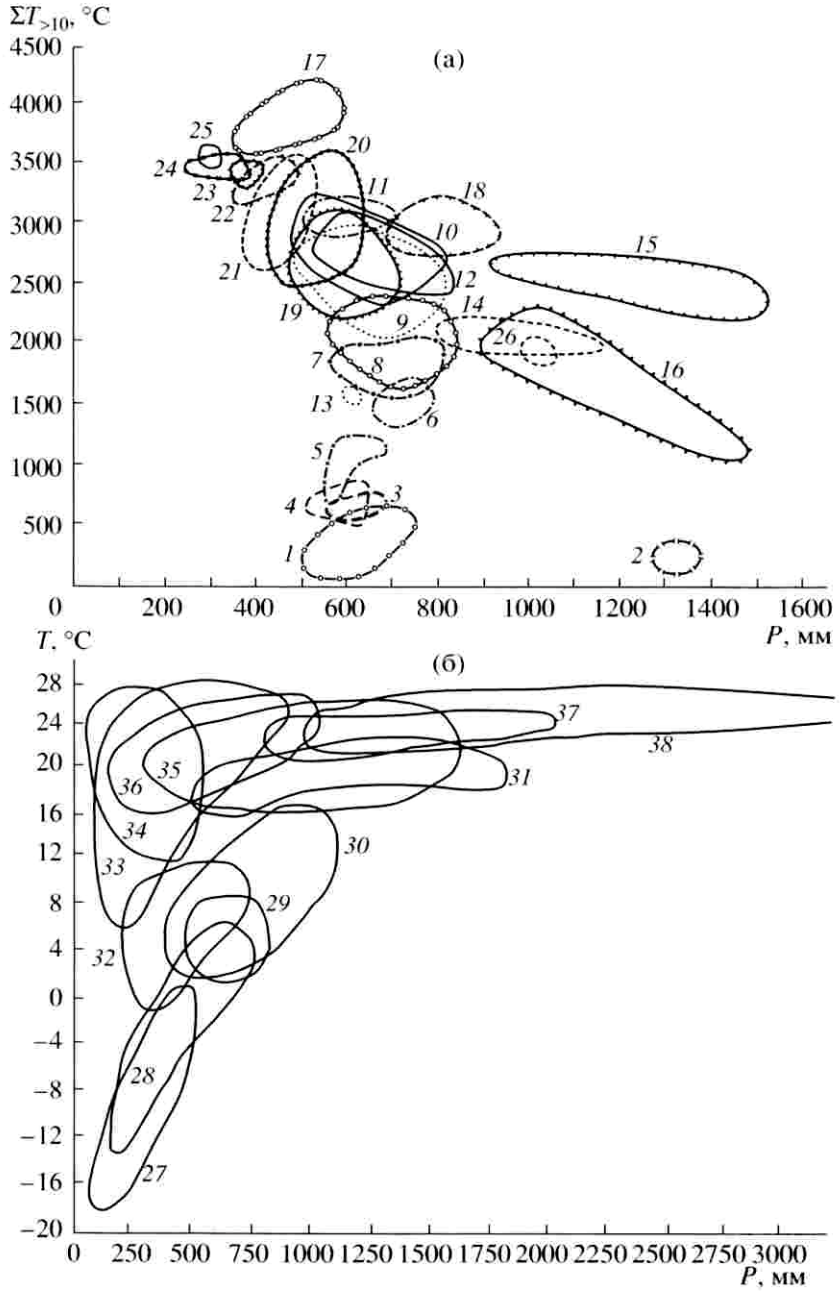


Рис. 1. Схемы распределения фитоклиматических ареалов основных природных экосистем Европейской территории бывшего СССР (а) и экосистем суши (б): *1* – тундры равнинные; *2* – тундры горные; *3* – лесотундра из *Betula tortuosa*; *4* – лесотундра из *Picea obovata*; *5* – северотаежные ельники (*P. abies*, *P. obovata*); *6* – среднетаежные ельники (*P. abies*, *P. obovata*); *7* – южнотаежные ельники (*P. abies*, *P. obovata*); *8* – подтаежные хвойно-широколиственные леса; *9* – дубово-осиновые и остепненные сосновые леса; *10* – восточноевропейские дубравы (*Quercus robur*); *11* – западные дубравы из *Q. petraea*; *12* – грабово-дубовые мезофильные леса; *13* – предуральские хвойно-широколиственные леса (*Pinus sylvestris*, *Larix sucaczewii*); *14* – буковые (и грабово-буковые) леса предгорий Юго-Западной Украины; *15* – пихтовые (*Abies alba*) леса нижнего пояса Карпат; *16* – горные ельники Карпат; *17* – можжевелово-дубовые (*Q. pubescens*) леса южного Крыма; *18* – сосновые (*Pinus stankewiczii*) горные леса южного Крыма; *19* – степи луговые; *20* – степи разнотравно-типчаково-ковыльные (настоящие); *21* – степи типчаково-ковыльные настоящие засушливые; *22* – степи полынно-злаковые сухие; *23* – степи полынно-злаковые сухие (опустыненные); *24* – полупустыни северные злаково-полынные; *25* – полупустыни южные полынно-солянково-злаковые; *26* – остепненные леса крымской Яйлы; *27* – тундры; *28* – хвойные леса; *29* – смешанные хвойно-широколиственные леса; *30* – лиственные леса; *31* – вечнозеленые леса тропиков и субтропиков; *32* – степи, прерии и пампасы; *33* – полупустыни; *34* – пустыни; *35* – саванны; *36* – тропические редколесья и кустарники; *37* – тропические леса, сбрасывающие листву на сухое время года; *38* – гилеи. По оси абсцисс – годовое количество осадков (*P*), по оси ординат – (а) годовая сумма среднесуточных значений приземной температуры выше 10°C ($\sum T_{>10}$) (Гребенщиков, 1986); (б) среднегодовая приземная температура (*T*) (Волобуев, 1947).

для этого необходимы десятки и сотни лет (Тишков, 2005).

Для оценки изменений ареалов типов растительности используются также и гэп-модели (Urban *et al.*, 1991; Чумаченко, 2004), которые описывают динамику растительного сообщества через реакцию отдельных видов. 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 типов растительности. Подробное описание в моделях этого типа физиологических и экологических закономерностей требует знания большого объема количественных, эмпирически определяемых характеристик изучаемых процессов, что делает достаточно проблематичным использование этих моделей для глобальных оценок изменений одновременно в нескольких типах растительности.

Анализ отклика глобального распределения растительности на климатические изменения возможен с помощью динамических моделей. Например, модель динамики глобального распределения растительности (Svirezhev, Zavalishin, 2003) позволяет определить для заданного климатического сценария распределение площадей, занимаемых травяной и древесной растительностью, в любой момент времени и оценить временные периоды достижения этими типами растительности равновесного состояния.

Для получения оценок влияния изменения климатических параметров на ход восстановления растительности используется моделирование процесса сукцессий. В качестве инструмента описания динамики растительных сообществ в пространстве и во времени в этих моделях выступает математический формализм дискретных цепей Маркова (Логофет, 1999; Balzter, 2000). В новом типе марковских моделей сукцессии (Логофет и др., 1997; Логофет, 1999; Логофет и др., 2005) вероятности переходов между стадиями сукцессионного процесса не постоянны и зависят от определенных климатчувствительных изменений факторов среды. Эти факторы среды, в свою очередь, зависят от времени в силу принятых сценариев изменения климата. Модели этого типа способны описывать изменения растительного покрова в ходе сукцессии в зависимости от климатчувствительных факторов среды и антропогенного воздействия на экосистемы. Следует отметить, что применение этих моделей для оценки возможных изменений ареалов некоторых экосистем имеет ряд проблем, связанных с заданием схемы сукцессии, т.е. некоторого набора определенных стадий сукцессии и переходов между ними, возможных за определенный интервал времени.

Оценка изменений в зональной структуре растительного покрова возможна на основе метода палеоаналогов. На основе этого метода (Величко, 2002) сделаны оценки вероятных изменений в состоянии растительного покрова на территории России в XXI в. вследствие антропогенных изменений климата. Однако метод палеоаналогов позволяет получить реконструкции, отражающие равновесное состояние зональной растительности и климата, тогда как изменения, которые могут произойти в течение ближайших десятилетий, не смогут достичь подобных равновесных состояний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно карте восстановленной растительности (Базилевич, 1993) для второй половины XX в. на равнинных территориях России выделены 69 зональных фитоценозов. В нашей работе для представления полученных результатов использованы следующие типы зональной растительности: лесные (еловые, сосновые, елово-кедровые, елово-кедрово-пихтовые, лиственничные, лиственнично-сосновые, широколиственно-хвойные, дубовые, липовые, осиново-березовые леса, заросли кедрового стланика), степные (луговые, настоящие, сухие степи), тундровые, полупустынные. Соотношение площадей, занимаемых этими типами растительности в Европейской и Азиатской частях России, приведены на рис. 2 и 3. Пространственное распределение рассматриваемых фитоценозов на территории России связано с определенными интервалами значений климатических параметров. Диапазоны изменения некоторых климатических характеристик для ареалов рассматриваемых фитоценозов приведены в табл. 1. Следует отметить, что данные этой таблицы указывают на отсутствие взаимооднозначности в соотношении "ареал фитоценоза – климатические характеристики" для зональных фитоценозов России.

Для оценки отклика ареалов фитоценозов на возможные изменения климата использованы результаты численных экспериментов с климатическими моделями общей циркуляции атмосферы и океана ECHAM4/OPYC3 Метеорологического института Макса Планка (Германия) (Roeckner *et al.*, 1996), HadCM3 Британской метеорологической службы (Collins *et al.*, 2001) и с климатической моделью промежуточной сложности Института физики атмосферы РАН (КМ ИФА РАН) (Petoukhov *et al.*, 1998; Мохов и др., 2005).

Региональные изменения ареалов растительности на территории России оценены при антропогенном потеплении, соответствующем изменению среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С, которое ожидается, согласно рассматриваемым климатическим моделям, в конце 30-х–начале 50-х гг. XXI в. Согласно этим моделям, пространственное изменение климати-

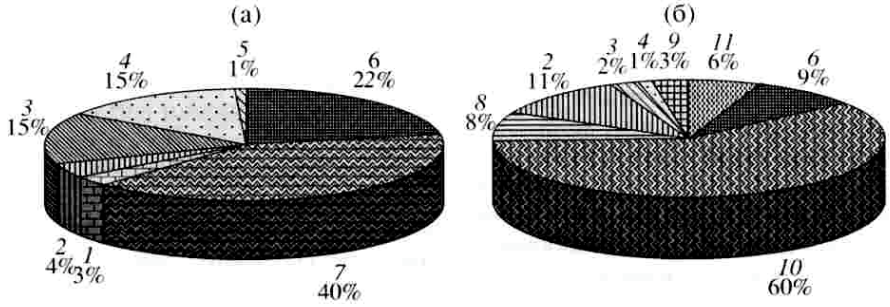


Рис. 2. Соотношение площадей, занимаемых различными типами лесов на Европейской (а) и Азиатской (б) частях территории России: *1* – елово-кедровые; *2* – елово-кедрово-пихтовые; *3* – широколиственно-хвойные; *4* – дубовые; *5* – липовые; *6* – сосновые; *7* – еловые; *8* – лиственнично-сосновые; *9* – осиново-березовые; *10* – лиственничные; *11* – заросли кедрового стланика.

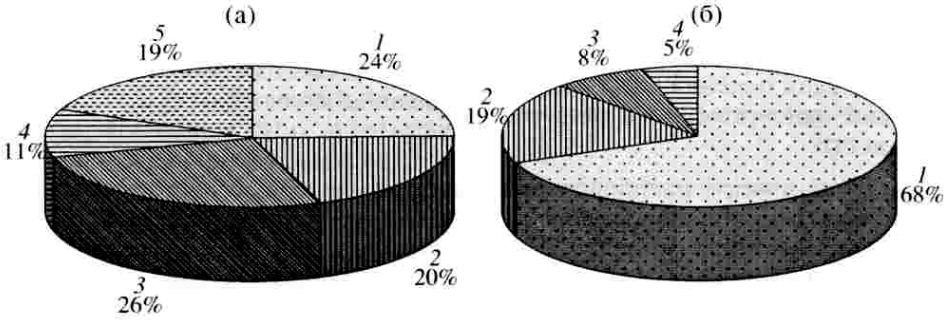


Рис. 3. Соотношение площадей, занимаемых травяной и тундровой растительностью на Европейской (а) и Азиатской (б) частях территории России: *1* – тундра; *2* – луговая степь; *3* – настоящая степь; *4* – сухая степь; *5* – полупустыня.

ческих характеристик на территории России при потеплении весьма неоднородно. Максимальное потепление следует ожидать зимой, для летнего сезона вероятны менее значительные изменения приземной температуры (табл. 2). Оценки изменения количества годовых осадков существенно отличаются. Сценарий КМ ИФА РАН предполагает повышение осадков на всей территории России за исключением некоторых ее северо-восточных районов. Наибольшее увеличение осадков по этой модели ожидается в полупустынных районах юга Европейской части России и на обширных территориях Западной и Средней Сибири, занятых южнотаежными лиственнично-сосновыми и лиственничными лесами. Согласно сценариям ECHAM4/OPYC3 и HadCM3, количество осадков на тундровых, степных, полупустынных территориях Европейской части России уменьшится. Наибольшее увеличение осадков по сценарию ECHAM4/OPYC3 ожидается на территориях произрастания южнотаежных темнохвойных и осиново-березовых лесов в Западной Сибири, широколиствено-хвойных и дубовых лесов в Маньчжурии. Согласно сценарию HadCM3, значительное увеличение осадков следует ожидать на обширных территориях средней и южной тайги Западной и Средней Сибири.

Оценить возможные изменения ареалов фитоценозов восстановленной растительности при потеплении климата на основе прогноза изменения значений климатических характеристик достаточно проблематично, так как соотношение "ареал фитоценоза – климатические параметры" не является взаимооднозначным. Для решения поставленной задачи были использованы величины изменения первичной биологической продукции фитоценозов при рассматриваемых климатических сценариях.

Первичная биологическая продукция (net primary production – NPP) является одной из основных количественных характеристик фитоценозов. Она определяется количеством органического вещества, нарастающим за определенный интервал времени (обычно это год) на единице площади в надземной и подземной частях растительного сообщества. В данной работе использована база данных экспериментальных значений первичной биологической продукции фитоценозов России (Базилевич, 1993). Для лесных фитоценозов Европейской части России (рис. 4а) характерно изменение значений NPP в диапазоне от 4.3 т/га в год (северотаежные сосновые леса) до 13.6 т/га в год (приуральские липовые леса). Продуктивность лесов Сибири и Дальнего Востока

Таблица 1. Интервалы значений испарения (E), радиационного баланса (R), годовой суммы осадков (P), средние температуры января (T_w) и июля (T_s) для ареалов зональной растительности России

Тип растительности	E, мм/год	R, ГДж/(м^2 год)	P, мм/год	T_w, °C	T_s, °C
Европейская часть России					
Тундра	45.7–181.2	0.5–1.0	400.0–820.0	–22.0...–6.0	3.8–13.0
Еловые леса	135.7–400.0	0.8–1.4	580.0–820.0	–22.0...–6.6	10.0–18.8
Елово-кедровые леса	194.4–275.0	1.1–1.2	783.3–870.0	–19.3...–15.7	13.3–17.1
Елово-кедрово-пихтовые леса	277.8–311.4	1.2–1.4	675.0–787.5	–16.1...–6.7	16.5–18.9
Сосновые леса	128.6–391.7	0.8–1.5	590.0–856.0	–18.8...–6.4	8.0–19.2
Смешанные леса	294.4–450.0	1.3–1.7	630.0–870.0	–16.3...–6.2	16.7–19.6
Дубовые леса	300.0–465.0	1.4–2.1	500.0–870.0	–15.1...0.0	17.9–22.5
Липовые леса	300.0–320.0	1.5–1.7	615.0–800.0	–16.4...–15.5	17.3–19.0
Луговые степи	300.0–455.6	1.4–2.1	540.0–787.5	–16.1...–2.5	17.4–22.5
Настоящие степи	266.7–455.0	1.6–2.1	450.0–760.0	–16.0...–2.1	19.8–23.9
Сухие степи	160.7–455.0	1.7–2.1	350.0–650.0	–15.4...–1.0	22.0–24.5
Полупустыни	156.7–455.0	1.7–2.1	216.7–650.0	–12.6...–2.0	22.6–25.5
Сибирь и Дальний Восток					
Тундра	35.7–157.1	0.3–1.2	320.0–800.0	–39.0...–16.0	–0.4–14.2
Елово-кедрово-пихтовые леса	159.1–355.0	1.0–1.4	500.0–870.0	–33.6...–16.6	13.6–19.2
Сосновые леса	175.0–342.9	1.0–1.8	357.1–800.0	–26.0...–16.0	13.3–20.8
Лиственничные леса	48.6–322.7	0.6 –1.0	320.0–870.0	–44.0...–16.0	8.0–18.2
Лиственнично-сосновые леса	162.5–256.7	1.1–1.6	364.4–666.7	–38.6...–18.0	12.0–19.5
Кедровый стланик	111.8–246.4	0.9–1.5	360.0–1624.0	–40.0...–4.2	7.0–13.1
Смешанные леса	302.1–341.3	1.6–2.0	590.0–823.3	–28.0...–12.0	16.3–19.3
Осиново-березовые леса	242.0–350.0	1.3–1.5	433.3–800.0	–20.6...–16.6	17.5–19.5
Дубовые леса	306.3–341.3	1.7–1.9	590.0–814.0	–27.8...–12.0	16.9–22.7
Луговые степи	226.5–340.0	1.3–1.6	366.7–852.5	–24.5...–16.4	16.0–20.0
Настоящие степи	246.1–314.3	1.4–1.8	333.3–595.0	–28.0...–16.3	16.4–21.5
Сухие степи	225.0–300.0	1.5–1.8	325.0–600.0	–29.0...–16.1	16.4–21.9

Примечание. Данные второй половины XX в. (Мировой ..., 1974; Климат ..., 2001).

(рис. 4б) изменяется в диапазоне от 3 т/га в год (заросли кедрового стланика и ольховника) до 11 т/га в год (дальневосточные дубовые леса). Среди нелесных фитоценозов наименьшие значения NPP наблюдаются у тундровых фитоценозов – около 2.4 и 3.6 т/га в год в Европейской (рис. 4в) и Азиатской (рис. 4г) частях территории России соответственно. Наибольшую продуктивность имеют луговые степи – приблизительно 20 т/га в год.

Между рядом климатических параметров и значениями NPP существуют сложные, нелинейные соответствия (Варлыгин, Базилевич, 1992; Голубятников, Денисенко, 2001а). В частности, первичная биологическая продукция растительного покрова России может быть представлена в виде непрерывной, однозначно определенной функции $f(R, E)$, где R – величина радиационного баланса, E – значение суммарного испарения (рис. 5). Эта зависимость лежит в основе модели для определения отклика биологической продуктивности растительности наземных экосистем на климатические изменения (Голубятников, Денисенко, 2001б; Голубятников и др., 2005).

Определим следующие правила изменения состояния фитоценоза при изменении значения его первичной биологической продукции:

– если прогнозируется уменьшение первичной биологической продукции фитоценоза на величину равную или превышающую ее значение для второй половины XX в., то этот фитоценоз исчезает; если такое снижение прироста происходит на части ареала фитоценоза, то фитоценоз исчезает только на этой части;

– если прогнозируется увеличение первичной биологической продукции фитоценоза в 1.5 раза или более по сравнению с ее значением во второй

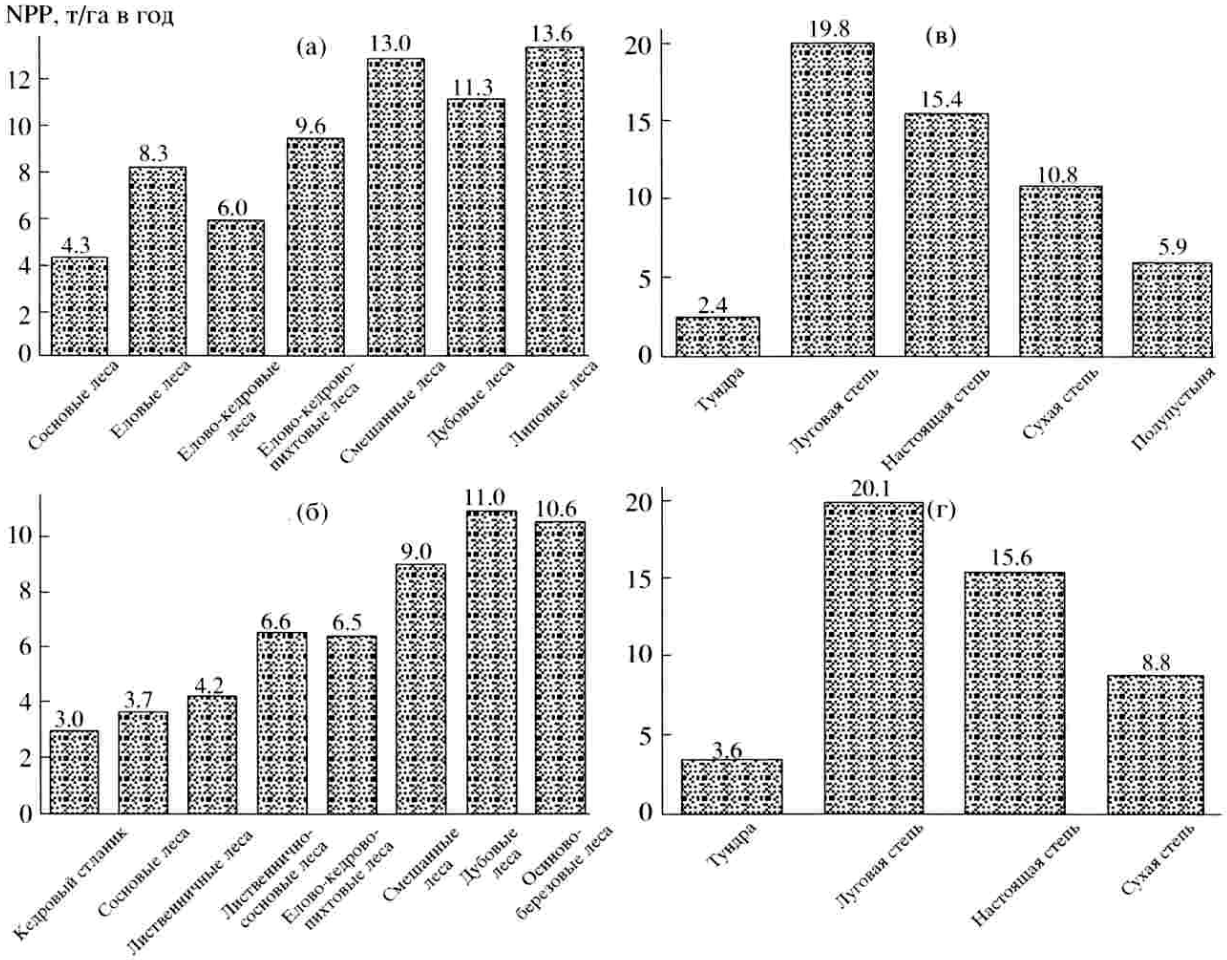


Рис. 4. Значения первичной биологической продукции (NPP) для лесных типов растительности на Европейской (а) и Азиатской (б) частях территории России и для травяных типов растительности и тундры на Европейской (в) и Азиатской (г) частях территории России (Базилевич, 1993).

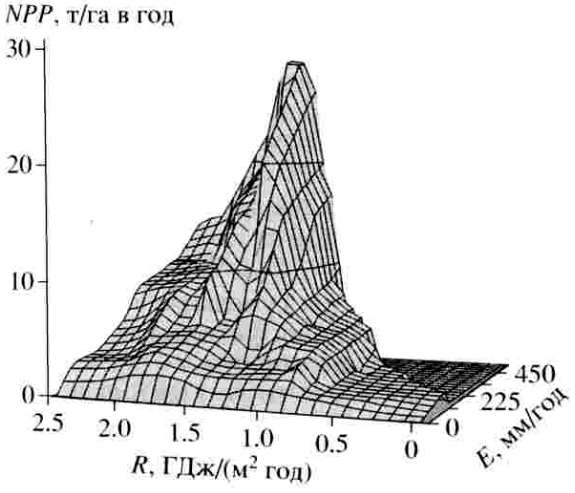


Рис. 5. Зависимость значений первичной биологической продукции (NPP) от радиационного баланса (R) и суммарного испарения (E) для регионов России.

половине XX в., то данный фитоценоз направленно изменяется во времени, что возможно только путем сукцессии; если такое увеличение прироста происходит на части ареала фитоценоза, то сукцессионным изменениям будет подвержен фитоценоз только на этой части его ареала.

Следует отметить, что в фитоценозах постоянно идут сукцессии, обусловленные различными природно-антропогенными причинами. В данной работе учитываются сукцессии, вызванные только климатическими факторами.

На основе прогнозных оценок изменения значений первичной биологической продукции фитоценозов и введенных правил зависимости состояния фитоценозов от предполагаемых изменений климата представляется возможным определить вероятные изменения ареалов зональных фитоценозов при изменении климата. Будем полагать, что если изменению подвергается более 30% от общей площади занятой фитоценозом, то этот фи-

Таблица 2. Средние значения изменений испарения (ΔE), радиационного баланса (ΔR), годовой суммы осадков (ΔP), средних температур января (ΔT_w) и июля (ΔT_s) согласно сценариям ECHAM4/OPYC3, КМ ИФА РАН, HadCM3 для ареалов зональной растительности России

Тип растительности	ΔE, мм/год			ΔR, ГДж/(м^2 год)			ΔP, мм/год			ΔT_w, °C			ΔT_s, °C		
	ECHAM	ИФА	HadCM	ECHAM	ИФА	HadCM	ECHAM	ИФА	HadCM	ECHAM	ИФА	HadCM	ECHAM	ИФА	HadCM
Европейская часть России															
Тундра	22.9	9.5	4.9	0.0	0.0	0.0	–8.1	51.7	–50.8	5.7	4.7	–0.3	1.0	1.3	0.6
Еловые леса	27.2	21.6	–15.8	0.2	0.2	0.2	38.5	41.1	–5.2	3.4	2.5	0.3	1.2	1.5	2.0
Елово-кедровые леса	31.8	21.7	8.0	0.2	0.2	0.2	71.1	44.2	18.5	3.7	2.5	–1.0	1.4	1.6	2.0
Елово-кедрово-пихтовые леса	22.7	24.2	–16.3	0.2	0.2	0.2	88.7	44.9	49.1	2.6	2.5	–0.1	1.5	1.8	2.4
Сосновые леса	26.4	21.9	–12.8	0.2	0.2	0.2	37.7	41.8	17.0	3.5	2.5	0.5	1.1	1.5	2.0
Смешанные леса	21.5	23.6	–10.1	0.2	0.2	0.2	33.9	46.9	13.1	2.0	2.6	0.9	1.3	1.6	2.6
Дубовые леса	21.0	22.3	26.9	0.1	0.1	0.2	51.0	55.0	–3.6	1.5	2.8	0.7	1.5	1.6	3.2
Липовые леса	11.1	21.2	–2.1	0.2	0.2	0.2	53.0	63.2	62.2	2.3	2.9	0.3	2.1	1.7	2.7
Луговые степи	14.7	23.5	32.6	0.1	0.1	0.2	55.7	55.3	13.5	1.5	2.8	0.7	1.7	1.5	3.3
Настоящие степи	16.1	29.9	66.9	0.2	0.1	0.2	35.6	59.2	29.5	1.3	2.6	0.8	1.8	1.4	2.9
Сухие степи	12.7	32.1	94.5	0.2	0.2	0.2	–33.3	68.9	–7.9	1.4	2.7	0.9	2.2	1.5	2.5
Полупустыни	16.4	32.2	103.5	0.1	0.1	0.1	–54.0	78.7	–6.8	1.5	2.7	0.9	2.4	1.5	2.3
Сибирь и Дальний Восток															
Тундра	16.5	27.2	4.4	0.0	0.0	0.0	40.6	47.0	54.6	5.5	6.1	2.1	1.7	1.3	0.8
Елово-кедрово-пихтовые леса	27.4	21.2	–101.7	0.3	0.2	0.1	56.2	66.7	115.6	4.7	2.8	0.6	2.1	1.8	1.6
Сосновые леса	26.4	21.9	1.8	0.2	0.2	0.1	58.7	66.1	80.3	4.7	2.8	–0.1	1.8	1.6	1.7
Лиственничные леса	22.0	20.4	–11.0	0.1	0.1	0.1	21.2	56.2	129.8	5.5	3.0	2.1	1.7	1.8	1.1
Лиственнично-сосновые леса	26.1	28.9	–67.3	0.2	0.2	0.1	29.2	79.7	185.0	4.2	2.9	1.1	1.9	2.1	1.6
Кедровый стланик	9.2	33.9	84.8	0.1	0.1	0.1	–49.8	25.1	78.3	1.9	0.9	3.1	1.8	1.3	1.6
Смешанные леса	19.7	46.9	206.0	0.1	0.1	0.2	73.1	33.0	147.8	3.4	1.5	2.0	0.8	1.0	2.1
Осиново-березовые леса	23.6	24.6	–50.3	0.3	0.2	0.2	83.9	66.2	130.9	3.3	2.8	0.5	2.3	1.8	2.0
Дубовые леса	12.5	50.7	208.2	0.1	0.1	0.2	99.9	37.8	146.0	3.2	1.5	1.7	0.8	1.0	1.9
Луговые степи	16.7	26.6	–37.2	0.2	0.2	0.2	46.9	64.7	133.3	2.9	2.9	1.0	2.4	1.8	2.0
Настоящие степи	8.5	25.6	94.5	0.2	0.1	0.2	69.1	63.4	148.8	2.9	2.8	1.3	2.3	1.5	2.0
Сухие степи	8.2	26.8	124.7	0.2	0.1	0.1	43.0	63.6	142.5	2.7	2.6	1.5	2.1	1.3	1.9

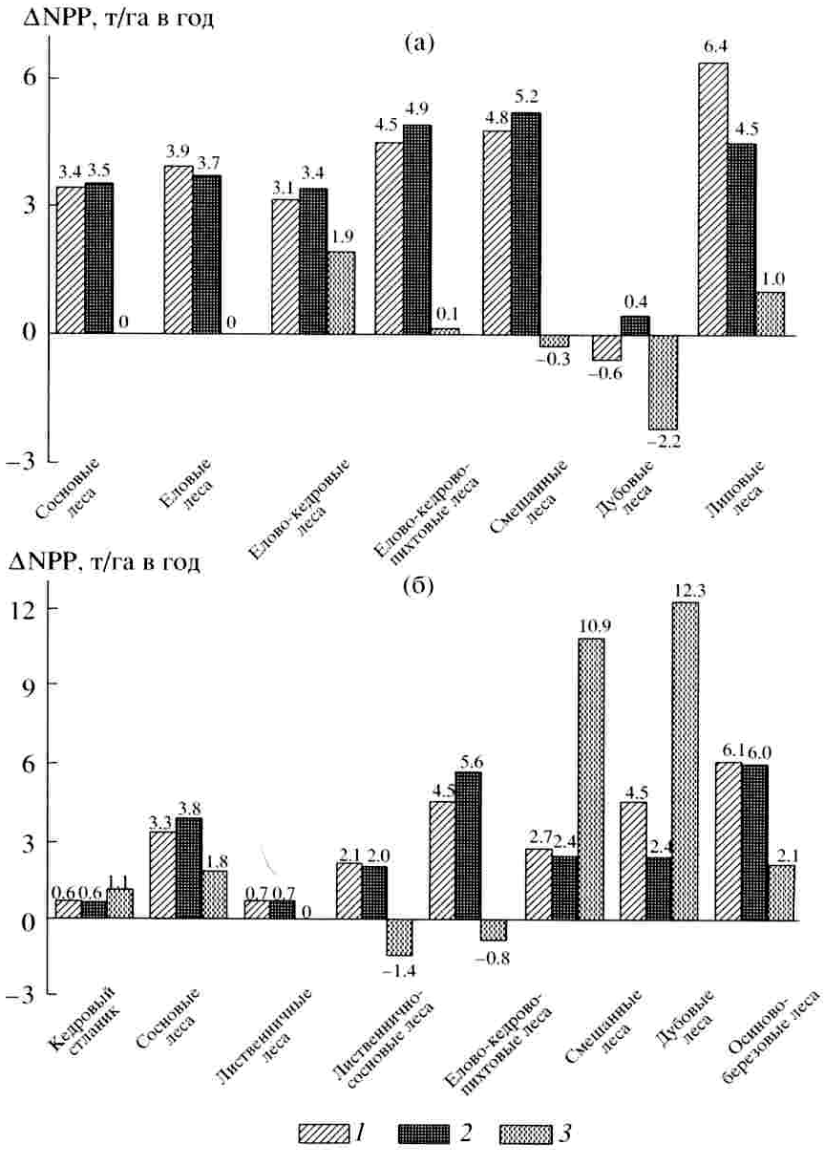


Рис. 6. Изменения значений первичной биологической продукции (ΔNPP) при климатических изменениях, связанных с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С в моделях КМ ИФА РАН (*1*), ECHAM4/OPYC3 (*2*) и HadCM3 (*3*) для лесных типов растительности на Европейской (а) и Азиатской (б) частях территории России и для травяных типов растительности и тундры на Европейской (в) и Азиатской (г) частях территории России.

тоценоз является чувствительным к климатическим воздействиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитаны возможные изменения продуктивности растительного покрова равнинных территорий России при увеличении среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С согласно климатическим моделям ECHAM4/OPYC3 и HadCM3 и КМ ИФА РАН (Голубятников и др., 2005). Согласно полученным оценкам, для лесных фитоценозов России ожидаемые климатические изменения будут иметь позитивный характер. По сценарию HadCM3 незначительное уменьшение значений продуктивности ожидается для лиственнично-сосновых и елово-кедрово-пихтовых лесов Сибири и Дальнего Востока, смешанных и дубовых лесов Европейской части России (рис. 6а). Аналогичный прогноз относительно продуктивности дубовых лесов Европейской части России дает сценарий КМ ИФА РАН. Согласно сценарию HadCM3, существенное увеличение продуктивности вероятно в смешанных лесах Сибири и дальневосточных дубовых лесах (рис. 6б). По прогнозу климатических изменений КМ ИФА

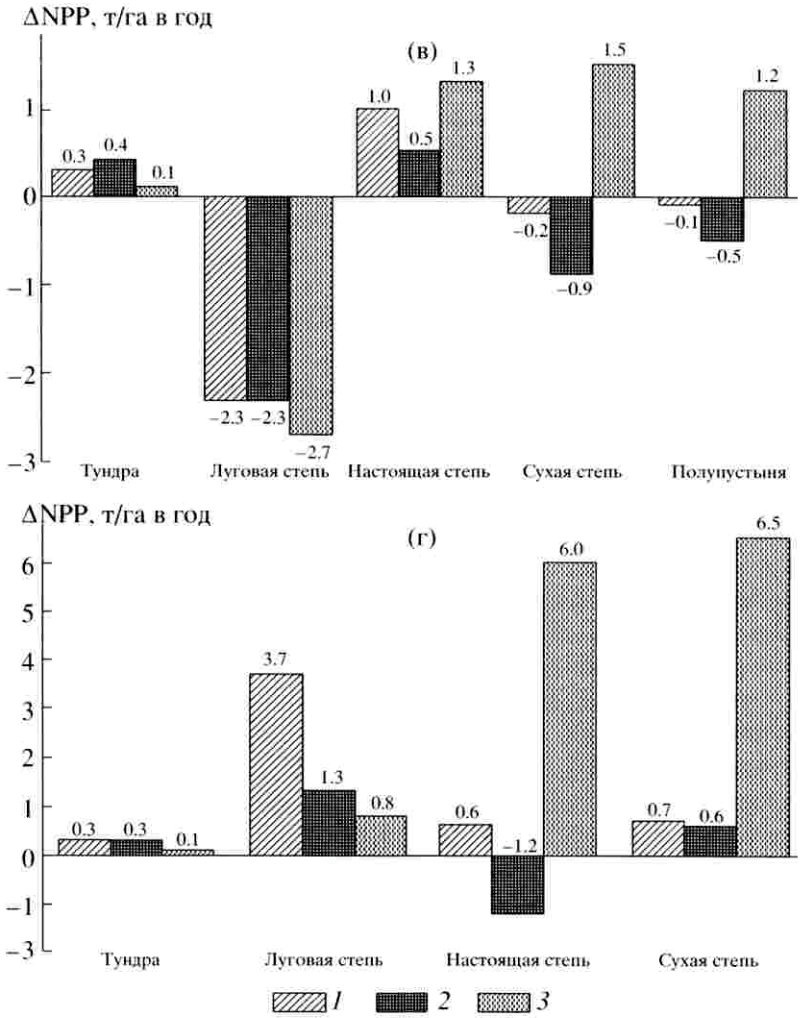


Рис. 6. Продолжение.

РАН значительно увеличится продуктивность липовых и дубово-липовых лесов предгорий Южного Урала. Для тундровых фитоценозов в среднем не ожидается больших изменений продуктивности. Все рассматриваемые климатические сценарии предполагают некоторое уменьшение продуктивности луговых степей Европейской части России (рис. 6в). Согласно сценариям КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3, получено незначительное понижение продуктивности фитоценозов сухих степей и полупустынь Европейской части России. По климатическому сценарию ECHAM4/OPYC3 вероятно уменьшение продуктивности фитоценозов сибирских настоящих степей (рис. 6г). Сценарий HadCM3 предполагает создание благоприятных климатических условий для развития фитоценозов настоящих и сухих степей Сибири.

На рис. 7 и 8 для каждого рассматриваемого типа зональной растительности России приведены доли их ареалов, на которых эти типы исчезают, изменяются в результате сукцессионных процессов или остаются в прежнем состоянии при климатических изменениях, связанных с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°C в моделях КМ ИФА РАН, ECHAM4/OPYC3 и HadCM3. Согласно сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН, исчезновения рассматриваемых зональных фитоценозов не ожидается. По климатическому сценарию HadCM3 возможно незначительное сокращение ареалов сосновых лесов из *Pinus sylvestris* как в Европейской части России (приблизительно на 30 тыс. км^2 средне- и южнотаежных лесов в верховьях Волги и Волжско-Вятском междуречье), так и в Западной Сибири (приблизительно на 21 тыс. км^2, из которых около 10 тыс. км^2 – это южнотаежные леса и 11 тыс. км^2 – остепненные леса в верхнем течении Оби).

Тундровые фитоценозы, ареалы которых занимают около 270 тыс. км^2 в Европейской части России и свыше 1380 тыс. км^2 в Сибири и на Дальнем Востоке, по всем рассматриваемым климатическим сценариям останутся в основном без изме-

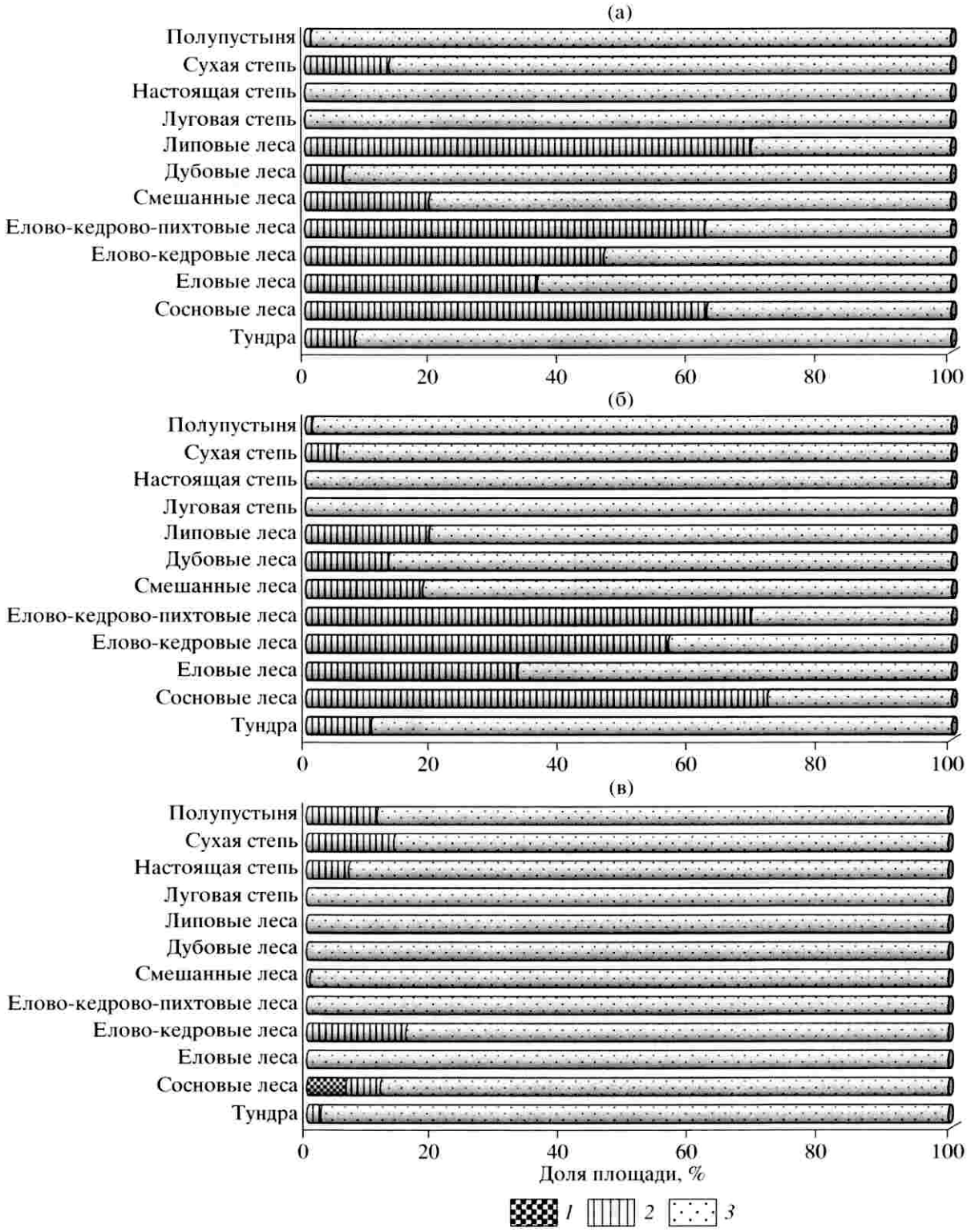


Рис. 7. Оценки площадей, занимаемых типами зональной растительности на Европейской части России, на которых они исчезают (*1*), изменяются в результате сукцессионных процессов (*2*) или остаются в прежнем состоянии (*3*) при климатических изменениях связанных с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С в моделях КМ ИФА РАН (а), ECHAM4/OPYC3 (б) и HadCM3 (в).

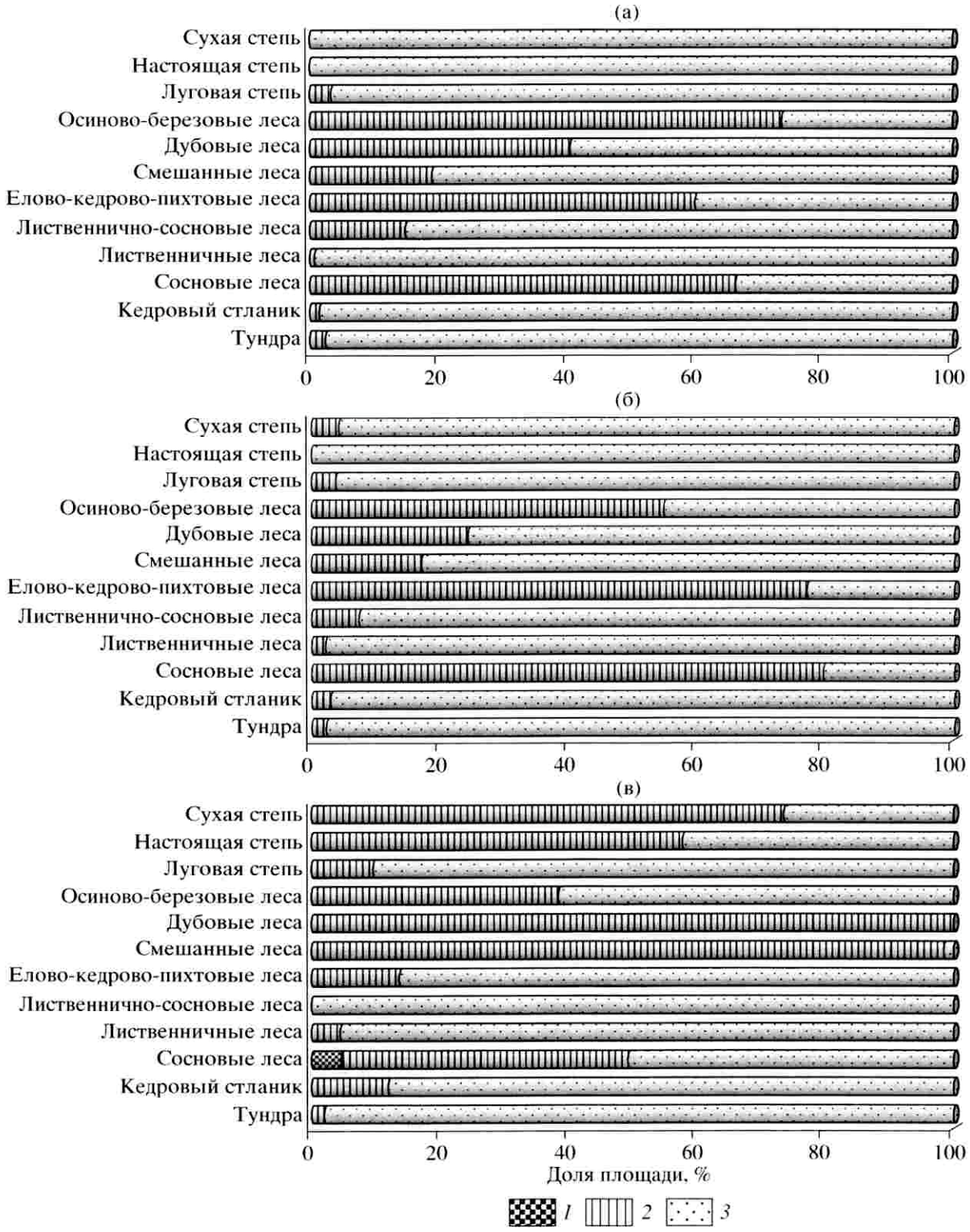


Рис. 8. Оценки площадей, занимаемых типами зональной растительности на Азиатской части России, на которых они исчезают (*1*), изменяются в результате сукцессионных процессов (*2*) или остаются в прежнем состоянии (*3*) при климатических изменениях связанных с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С в моделях КМ ИФА РАН (а), ECHAM4/OPYC3 (б) и HadCM3 (в).

нений. Сукцессионные процессы будут интенсивно происходить в этих фитоценозах на незначительной части их ареалов площадью около 30 тыс. км^2 на территории Азиатской части России и от 6 тыс. км^2 (сценарий HadCM3) до 21–28 тыс. км^2 (сценарии КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3) на территории Европейской части России. Изменения ожидаются в южных пушицево-осоковых кочкарных тундрах из *Eriophorum vaginatum* и *Carex lugens* на северо-восточном побережье залива Шелихова и в междуречье Анадыря и Великой, в южных кустарниковых тундрах из *Betula nana*, *B. exilis*, *Salix phylicifolia*, *S. glauca* и *S. lanata* северо-восточной части Кольского полуострова и юго-восточной части полуострова Ямал. По сценариям КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3 вероятны также изменения в фитоценозах типичных кустарничковых тундр из *Empetrum nigrum*, *S. herbacea* и *Dryas punctata* южной части Гыданского полуострова.

Под воздействием прогнозируемых климатических изменений в большинстве лесных фитоценозов на территории России, занимающих более 2200 тыс. км^2 Европейской части России и свыше 5200 тыс. км^2 равнинных территорий Сибири и Дальнего Востока, начнутся сукцессионные изменения. Согласно сценариям КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3 ожидается, что средне- и южнотаежные сосновые леса из *Pinus sylvestris* Европейской части России будут изменяться на существенной части своего ареала – приблизительно от 260 до 320 тыс. км^2. По сценарию HadCM3 изменения этого фитоценоза будут происходить только в Вычегдо-Камском междуречье на площади не более 28 тыс. км^2. По сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН вероятны также изменения в северотаежных сосновых лесах из *P. sylvestris* в южной Карелии на площади до 40 тыс. км^2. Климатические изменения, согласно рассматриваемым сценариям, вызовут сукцессионные процессы в сосновых западносибирских лесах из *P. sylvestris*: в северотаежных фитоценозах этого типа вероятны изменения на площади 40–130 тыс. км^2, в средне- и южнотаежных – на площади 130–210 тыс. км^2, в остепненных – на площади 10–30 тыс. км^2. По сценариям КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3 на Европейской части России сукцессионными изменениями будут охвачены еловые леса: среднетаежные из *Picea abies* на площади около 170 тыс. км^2, среднетаежные из *P. obovata* на площади 70–100 тыс. км^2, южнотаежные из *P. abies* на площади 20–100 тыс. км^2. По сценарию ECHAM4/OPYC3 возможны также изменения в северотаежных темнохвойных лесах из *P. abies* в Онежско-Северодвинском междуречье на территории около 8 тыс. км^2. При рассматриваемых климатических сценариях сукцессионные процессы вероятны в среднетаежных темнохвойных западноприуральских лесах из *P. obovata* и *Pinus sibirica* на площади от 10 тыс. км^2 (оценка по HadCM3) до 30 тыс. км^2 (оценка по ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН). По сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН южнотаежные темнохвойные западноприуральские леса из *P. obovata*, *P. sibirica* и *Abies sibirica*, произрастающие на площади около 12 тыс. км^2, будут полностью охвачены сукцессионными процессами. Эти климатические сценарии предполагают также изменения в южнотаежных темнохвойных лесах из *P. obovata* и *A. sibirica* в Вятско-Камском междуречье на площади около 50 тыс. км^2. Следует отметить, что сценарий HadCM3 не предполагает каких-либо изменений в фитоценозах еловых и елово-кедрово-пихтовых лесов Европейской части России. По сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН ожидаются изменения в елово-кедрово-пихтовых западносибирских лесах из *P. obovata*, *P. sibirica* и *A. sibirica* на значительных частях их ареалов: в среднетаежных фитоценозах на площади 100–200 тыс. км^2, в южнотаежных – на площади около 260 тыс. км^2. По прогнозу сценария HadCM3 сукцессионными процессами будут охвачены фитоценозы этих лесов на площадях около 11 и 70 тыс. км^2 соответственно. Климатические изменения, согласно рассматриваемым сценариям, вызовут сукцессионные процессы в северотаежных лиственничных, елово-лиственничных западносибирских лесах с *Larix sibirica* на площади 4–17 тыс. км^2, в среднетаежных лиственничных мохово-травяно-кустарничковых и кустарничковых лесах с *L. gmelinii* на площади 10–60 тыс. км^2. Согласно сценарию HadCM3, лиственничник заболоченного южного типа с *L. gmelinii* и *Sphagnum* sp. в Маньчжурии, ареал которого около 52 тыс. км^2, будет полностью подвержен изменениям, в то время как по сценариям ECHAM4/OPYC3, КМ ИФА РАН этот фитоценоз подвергнется изменениям на площади не более чем в 4–6 тыс. км^2. Сценарий ECHAM4/OPYC3 предполагает изменения в фитоценозах как средне- и южнотаежных лиственничных центральносибирских лесов из *L. sibirica* и *P. obovata* в междуречье Енисея и Подкаменной Тунгуски, так и северотаежных лиственично-елово-кедровых западносибирских лесов из *P. obovata*, *P. sibirica* и *L. sibirica* в среднем и нижнем течении реки Вах на незначительных частях их ареалов – около 6 и 10 тыс. км^2 соответственно. По сценарию HadCM3 вероятны изменения в таких фитоценозах, как южнотаежные лиственничные леса из *L. gmelinii* на площади около 15 тыс. км^2 в Маньчжурии и лиственничники заболоченные северного типа из *L. gmelinii* и *Sphagnum* sp. на площади около 13 тыс. км^2 в нижнем течении Амура. По сценариям ECHAM4/OPYC3, КМ ИФА РАН возможны изменения в среднетаежных (на площади около 25 тыс. км^2) и южнотаежных (на площади от 6 до 35 тыс. км^2) лиственнично-сосновых центральносибирских лесах из *L. sibirica* в Енисейско-Ангарском междуречье. При прогнозируемых климатических изменениях начнутся сукцес-

сионные процессы в зарослях кедрового стланика из *P. pumila* и ольховника из *Duschekia kamtschatica* и *D. fruticosa*, которыми покрыты большие площади на равнинных участках побережий Охотского и Берингова морей. Сукцессионные изменения этого фитоценоза вероятны на северо-западе полуострова Камчатка на площади около 5 тыс. км^2 (по всем рассматриваемым сценариям), на юго-западе этого полуострова на площади около 20 тыс. км^2 (по сценарию HadCM3), а также на побережье Берингова моря в районах нижнего течения реки Хатырка и озера Пэкульнейского на площади около 10 тыс. км^2 (по сценарию HadCM3). Согласно рассматриваемым климатическим сценариям, сукцессионные изменения ожидаются в широколиственно-хвойных лесах из *P. obovata*, *A. sibirica* и *Quercus robur* в среднем течении реки Белая на площади от 2 тыс. км^2 (по сценарию HadCM3) до 17–25 тыс. км^2 (по сценарим ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН). Широколиственно-хвойные леса из *P. abies* и *Q. robur* в верхнем течении реки Волги по сценариям КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3 будут подвержены изменениям на площади около 44 тыс. км^2. Согласно сценарию HadCM3, кедрово-широколиственные леса в сочетании с елово-пихтовыми лесами из *P. koraiensis*, *Abies holophylla* и *A. nephrolepis* в Маньчжурии будут охвачены сукцессионными изменениями на всем ареале площадью около 80 тыс. км^2, в то время как сценарии ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН предполагают подобные изменения приблизительно на площади 22 тыс. км^2 этих лесов. По сценарию HadCM3 в этом же регионе сукцессионные изменения охватят практически все широколиственно-хвойные леса из *L. gmelinii* и *Q. mongolica* на площади около 44 тыс. км^2. Сценарии ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН предполагают сукцессионные изменения в липовых и дубово-липовых лесах из *Tilia cordata* и *Q. robur* в предгорьях Южного Урала на площади 4–13 тыс. км^2 и в дубовых лесах из *Q. robur* с участием других широколиственных пород (*T. cordata*, видов *Acer*) на восточной части Смоленско-Московской возвышенности и в Мещерской низине на площади 20–40 тыс. км^2. Согласно сценарию HadCM3, дубовые леса из *Q. mongolica* с участием *T. amurensis* площадью около 55 тыс. км^2 в Маньчжурии будут полностью охвачены сукцессионными изменениями, в то время как по сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН сукцессионные процессы в лесах этого типа вероятны только на площадях около 13 и 22 тыс. км^2 соответственно. Сукцесионные изменения коснутся и осиново-березовых лесов из *B. pendula*, *B. pubescens* и *Populus tremula* в Западной и Центральной Сибири. Ожидается, что изменения в этих лесах будут происходить на площадях от 64 тыс. км^2 (оценка по сценарию HadCM3) до 90–120 тыс. км^2 (оценки по сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН).

Ожидаемое потепление климата приведет к частичному изменению степных фитоценозов, занимающих около 628 тыс. км^2 в Европейской части России и более 625 тыс. км^2 в Сибири. Все рассматриваемые климатические сценарии предполагают сукцессионные процессы в фитоценозах злаковых сухих степей с *Stipa lessingiana* Южного Урала на площади от 6 тыс. км^2 (оценка по сценарию ECHAM4/OPYC3) до 43 тыс. км^2 (оценка по сценарию HadCM3). По сценарию HadCM3 вероятны изменения в аналогичных фитоценозах Кулундинской степи на площади около 10 тыс. км^2. Ожидаются изменения в луговых степях из *S. pennata*, *S. stenophylla* и *Helictotrichon desertorum* и остепненных лугах в сочетании с березовыми и осиновыми колками в Иртышско-Обском междуречье на площади около 14 тыс. км^2 (оценка по сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН), на Южным Урале и Ишимской степи на площади около 36 тыс. км^2 (оценка по сценарию HadCM3). По сценариям ECHAM4/OPYC3 и HadCM3 сукцессионным процессом будет охвачен фитоценоз злаковых с *Cleistogenes squarrosa* сухих южносибирских степей в Забайкалье на площади от 4 до 28 тыс. км^2. Согласно сценарию HadCM3, ожидаются изменения на площади более 110 тыс. км^2 в фитоценозах разнотравно-злаковой настоящей умерено засушливой степи с *S. lessingiana*, *S. zalesskii* на Южном Урале и Кулундинской степи, разнотравно-злаковой настоящей засушливой степи с *S. lessingiana* и *S. zalesskii* на Южном Урале, настоящей разнотравно-злаковой степи с *Tanacetum sibirica* и *Leymus chinensis* в Забайкалье.

Полупустынные и пустынные фитоценозы Европейской части России, занимающие около 208 тыс. км^2 ее территории, согласно рассматриваемым сценариям климатических изменений, на больших частях своих ареалов будут оставаться неизменными. Сценарий HadCM3 предполагает, что сукцессионым изменениям будут подвержены фитоценозы полынно-злаковой полупустыни с *Artemisia lerchiana*, *A. sublessingiana* на площади около 7 тыс. км^2, злаково-полынной северной пустыни с *A. lerchiana*, *A. sublessingiana*, *A. pauciflora* на площади около 6 тыс. км^2, северной псаммофитной пустыни с *Stipagrostis pennat*, *Koeleria glauca* и *L. racemosus* на площади немногим более 6 тыс. км^2. По сценарию КМ ИФА РАН ожидаются изменения в фитоценозе полынно-злаковой полупустыни с *A. lerchiana* и *A. sublessingiana* на незначительной части ареала площадью приблизительно 2 тыс. км^2.

Согласно всем рассматриваемым сценариям выделяются следующие чувствительные к климатическим воздействиям фитоценозы: южнотаежные западносибирские леса из *P. obovata*, *P. sibirica*, *A. sibirica*; средне- и южнотаежные западносибирские леса из *P. sylvestris*; остепненные сосновые казахстанско-западносибирские леса;

осиново-березовые леса Западной Сибири из *B. pendula*, *B. pubescens*, *P. tremula*; дальневосточные леса из *Q. mongolica* с участием *T. amurensis*. По сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН к этой группе фитоценозов относятся также среднетаежные темнохвойные леса из *P. abies* и *P. obovata*; южнотаежные темнохвойные леса из *P. obovata* и *A. sibirica*; средне- и южнотаежные леса из *P. sylvestris*; среднетаежные темнохвойные западноприуральские леса из *P. obovata* и *P. sibirica*; южнотаежные темнохвойные западноприуральские леса и среднетаежные западносибирские леса из *P. obovata*, *P. sibirica* и *A. sibirica*; северотаежные западносибирские леса из *P. sylvestris*; полынно-злаковые полупустыни из *A. lerchiana* и *A. sublessingiana*. Сценарий КМ ИФА РАН дополняет эту группу южнотаежными темнохвойными лесами из *P. abies*; липовыми и дубово-липовыми лесами предгорий Южного Урала из *T. cordata*, *Q. robur*. По сценарию HadCM3 чувствительными к климатическим воздействиям фитоценозам также являются: лиственничники заболоченные северного и южного типов из *L. gmelinii*, *Sphagnum* sp.; широколиственно-хвойные леса из *L. gmelinii*, *Q. mongolica*; сосново-широколиственные леса из *Q. robur*, *P. sylvestris*; дальневосточные кедрово-широколиственные леса в сочетании с елово-пихтовыми лесами из *P. koraiensis*, *A. holophyila*, *A. nephrolepis*; полынно-дерновинно-злаковые сухие степи из *Artemisia maritima*, *A. taurica*, *S. capillata*, *Festuca valesiaca*, *Agropyrum pectiniforme*; разнотравно-злаковые настоящие умерено-засушливые и настоящие засушливые степи из *S. lessingiana*, *S. zalesskii*; злаковые сухие степи из *S. lessingiana;* восточносибирские настоящее разнотравно-злаковые степи из *T. sibirica* и *L. chinensis*; злаковые сухие южносибирские степи из *C. squarrosa*; северные псаммофитные пустыни с *Stipagrostis pennata*, *Koeleria glauca*, *L. racemosus*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современному потеплению климата свойственны беспрецедентный темп его изменения и пространственно-временная неоднородность. Это предопределяет сложную и неоднозначную реакцию отдельных фитоценозов и экосистем. Потепление климата может повлечь серьезные изменения в структуре, видовом составе и сезонной динамике растительных сообществ, что приведет к изменениям ареалов отдельных фитоценозов. В настоящей работе для равнинных территорий России проанализированы возможные изменения ареалов зональных фитоценозов восстановленной растительности при антропогенном потеплении, соответствующем повышению среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°С согласно моделям КМ ИФА РАН, ECHAM4/OPYC3 и HadCM3, на основе данных об изменениях значений первичной биологической продукции фитоценозов при рассматриваемых климатических сценариях и предложенных правил зависимости состояния фитоценоза от изменения значения его биологической продуктивности.

Под воздействием вероятных климатических изменений по сценарию HadCM3 возможно сокращение приблизительно на 6% ареала средне- и южнотаежных сосновых лесов в Европейской части России, а также ареалов южнотаежных сосновых лесов и остепненных сосновых лесов Западной Сибири приблизительно на 4% и 23% соответственно.

Согласно рассматриваемым климатическим сценариям, примерно в половине фитоценозов на территории России начнутся или будут протекать более интенсивно сукцессионные процессы на тех или иных частях их ареалов. Ожидается, что сукцессионные изменения растительного покрова будут происходить на площади от 1 млн. км^2 (оценка по сценарию HadCM3) до 2 млн. км^2 (оценка по сценарию ECHAM4/OPYC3) равнинных территорий России, общая площадь которых около 10 млн. км^2. Согласно сценариям климатических изменений КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3, южнотаежные темнохвойные западноприуральские леса будут подвержены сукцессионным изменениям на всей территории произрастания. Расчеты, сделанные с учетом сценария HadCM3 показали, что сукцессионные изменения возможны в таких дальневосточных фитоценозах, как лиственничники заболоченные южного типа, дубовые леса с участием липы амурской, кедрово-широколиственные леса в сочетании с елово-пихтовыми лесами на всей территории их произрастания. По этому сценарию сукцессионные изменения вероятны в злаковых сухих южносибирских степях Забайкалья и широколиственно-хвойных лесах Дальнего Востока на большей (более 70%) части их ареалов. Согласно сценариям КМ ИФА РАН и ECHAM4/OPYC3, сукцессионные изменения будут происходить в таких фитоценозах, как среднетаежные темнохвойные леса, средне- и южнотаежные сосновые леса Европейской части России, южнотаежные елово-кедрово-пихтовые западносибирские леса, средне- и южнотаежные сосновые западносибирские леса на значительных (более 70%) территориях занятых этими фитоценозами. Вероятно также, что северотаежные сосновые западносибирские леса и осиново-березовые леса Западной Сибири будут подвержены сукцессионным изменениям на больших частях своих ареалов – более 80% (оценка по сценарию ECHAM4/OPYC3) и более 73% (оценка по сценарию КМ ИФА РАН) соответственно.

Согласно рассматриваемым сценариям климатических изменений, фитоценозы луговой степи Ев-

ропейской части России, занимающие площадь около 220 тыс. км^2, сохранят свои ареалы, несмотря на ожидаемое снижение продуктивности этих фитоценозов в среднем на 2–3 т/га в год. По сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН, каких-либо существенных изменений фитоценозов настоящей степи, занимающих около 288 тыс. км^2 в Европейской части России и около 160 тыс. км^2 в Западной и Центральной Сибири, не произойдет. Сценарий КМ ИФА РАН не предполагает изменений в фитоценозах сибирских сухих степей площадью около 937 тыс. км^2. Согласно сценарию ECHAM4/OPYC3, фитоценозы полупустынь и пустынь занимающие площадь свыше 207 тыс. км^2 на юге Европейской части России сохранят свои ареалы.

Согласно сценариям ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН, в той или иной степени все лесные фитоценозы как Европейской части России, так и Сибири и Дальнего Востока будут охвачены сукцессионными процессами. По сценарию HadCM3 не ожидается изменений в таких лесных фитоценозах, как еловые леса площадью более 900 тыс. км^2, елово-кедрово-пихтовые леса площадью около 93 тыс. км^2, липовые леса площадью около 18 тыс. км^2 и дубовые леса площадью более 327 тыс. км^2 Европейской части России и лиственнично-сосновые леса средней и южной тайги площадью около 3.4 млн. км^2 Азиатской части России.

Чувствительные к предстоящим климатическим изменениям зональные фитоценозы России во второй половине XX в. занимали площадь от 1.1 млн. км^2 (оценка согласно сценарию HadCM3) до 2.4 млн. км^2 (оценка согласно сценарию КМ ИФА РАН).

Полученные результаты указывают на мозаичный характер возможных изменений фитоценозов внутри их современных ареалов. Приведенные сценарные расчеты позволяют выявить пространственные тенденции и масштабы вероятных изменений структуры фитоценотического покрова России.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 05-05-65167, 06-05-64502).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Белотелов Н.В., Богатырев Б.Г., Кириленко А.П., Веневский С.В. Моделирование динамики растительности при неравновесных сценариях глобальных изменений климата // Проблемы мониторинга и моделирования лесных экосистем. М.: ЦЭПЛ РАН, 1995. С. 252–277.

Будыко М.И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.

Величко А.А. Устойчивость ландшафтной оболочки и ее био- и георазнообразие в свете динамики широтной зональности // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 5. С. 7–21.

Волобуев В.Р. О фитоклиматических закономерностях в распределении растительности на территории СССР // Ботан. журн. 1947. № 5. С. 200–205.

Варлыгин Д.Л., Базилевич Н.И. Связи продукции зональных растительных формаций мира с некоторыми параметрами климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 1992. № 1. С. 23–32.

Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Моделирование значений первичной биологической продукции для зональной растительности Европейской России // Изв. РАН. Сер. биол. 2001а. № 3. С. 353–361.

Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Отклик первичной биологической продукции растительности Европейской России на изменение климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001б. № 6. С. 42–50.

Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Денисенко Е.А., Тихонов В.А. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 25–35.

Гребенщиков О.С. Климатическая характеристика ареалов зональных природных экосистем // Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. С. 31–50.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Мониторинг климата и оценка климатической изменчивости по данным наблюдений // Глобальные изменения климата и их последствия для России. М.: РООУППГ, 2002. С. 9–39.

Климат России. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 655 с.

Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Турчинович И.Е. Влияние изменений климата на природную зональность и экосистемы России // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 205–210.

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.

Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.

Логофет Д.О. Сукцессионная динамика растительности: классические концепции и современные модели // Экология России на рубеже XXI века. Т. 1. М.: Науч. мир, 1999. С. 70–98.

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.

Логофет Д.О., Денисенко Е.А., Голубятников Л.Л. Сукцессии в лесостепи в условиях изменения климата: модельных подход // Журн. общ. биологии. 2005. Т. 66. № 2. С. 112–121.

Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. М.; Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 637 с.

Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.

Тишков А.А. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука, 2005. 310 с.

Чумаченко С.И. Имитационная модель динамики древесной синузии лесного ценоза // Восточноевропейские леса. М.: Наука, 2004. С. 43–58.

Balzter H. Markov chain models for vegetation dynamics // Ecol. Modelling. 2000. V. 126. P. 139–154.

Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. *et al.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.

Collins M., Tett S.F.B., Cooper C. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // Clim. Dyn. 2001. V. 17. P. 61–81.

Holdridge L.R. Life zone ecology. Costa Rica: Tropical Sci. Center, 1967. 206 p.

Lieth H. Modeling the primary productivity of the world / Eds. Lieth H., Whittaker R.H. Primary productivity of the biosphere. N. Y.: Springer, 1975. P. 237–262.

Mann M.E., Jones P.D. Global surface temperatures over the past two millennia // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 15. P. 1820–1823.

Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Semenov V.A. The IAP RAS global climate model. M.: Dialogue-MSU, 1998. 110 p.

Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L. et al. The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model descripition and simulation of present-day climate. Hamburg: Max-Planck Inst., 1996. № 218. 90 p.

Root T.L., Price J.T., Hall K.R. et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants // Nature. 2003. V. 421. P. 57–60.

Svirezhev Yu.M., Zavalishin N.N. "Forest-grass" global vegetation model with forest age structure // Ecol. Modelling. 2003. V. 160. P. 1–12.

Urban D.L., Bonan G.B., Smith T.M. et al. Spatial application of gap models // For. Ecol. Manag. 1991. V. 42. P. 95–110.

Model Estimates of Climate Change Impact on Habitats of Zonal Vegetation for the Plain Territories of Russia

L. L. Golubyatnikov and E. A. Denisenko

Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per. 3, Moscow, 119017 Russia

e-mail: golub@ifaran.ru

Abstract—Possible changes in the habitats of zonal phytocenoses for the plain territories of Russia under a 1°C increase in the annual mean global surface temperature are estimated by simulation with the atmosphere–ocean general circulation models ECHAM4/OPYC3 and HadCM3 and the intermediate-complexity climate model of the Institute of Atmospheric Physics for anthropogenic scenarios of greenhouse gas changes. The response of the phytocenotic habitats to possible climate changes is estimated from the changes in net primary production for the considered climatic scenarios. The obtained data allowed us to recognize the zonal phytocenoses most sensitive to climate changes.