ЖУРНАЛ ОБЩЕЙ БИОЛОГИИ, 2010, том 71, № 1, с. 85–96

УДК 574.4:536.757

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ

© 2010 г. Л.Л. Голубятников[1], Е.А. Денисенко[1,2]

[1]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017 Москва, Пыжевский пер., 3
[2]Институт географии РАН
119017 Москва, Старомонетный пер., 29
e-mail: golub@ifaran.ru

Поступила в редакцию 20.01.2009 г.

На основе термодинамического подхода проанализированы возможные изменения зональных фитоценозов территории Европейской России при потеплении, соответствующем повышению среднегодовой глобальной температуры воздуха на 1 °С согласно модели общей циркуляции атмосферы и океана HadCM3 Центра Хэдли Метеорологической службы Великобритании и климатической модели промежуточной сложности Института физики атмосферы РАН. Получены оценки годового производства энтропии растительным покровом рассматриваемой территории во второй половине XX в. и изменения этой величины при возможном потеплении.

Применение фундаментальных концепций и методов термодинамики в теоретической и математической экологии для описания биологических сообществ и экосистем обсуждается на протяжении длительного времени и этому вопросу посвящены многие научные публикации (см., например, Алексеев, 1976; Веневский, 1991; Изаков, 1997; Приц, 1974; Ребане, 1984; Jørgensen, 1997; Kerner, 1957; Morovitz, 1970). Однако попытки напрямую применить методы термодинамики для описания и анализа общих свойств экологических систем встречают ряд принципиальных трудностей и к большому успеху не привели (Свирежев, 1976, 1991; Svirezhev, 1998).

В ряде научных публикаций Свирежева (Svirezhev, 1998, 2000, 2001a,b; Svirezhev, Svirejeva-Hopkins, 1997; Jørgensen, Svirezhev, 2004) подробно освещены такие вопросы, как корректное формулирование концепции термодинамической системы в отношении экологических систем, корректное применение методов термодинамики в экологии, описание поведения экосистем в терминах термодинамики, задача выбора физического критерия для оценки антропогенного воздействия на экосистемы. В конце 2006 г. Ю.М. Свирежев начал работать над новой книгой "Эволюционное эссе: биологическая эволюция, энтропия и информация. Термодинамическая интерпретация биологической эволюции". К сожалению, он не успел завершить эту работу.

Данная статья посвящена анализу отклика растительного покрова Европейской России на ожидаемые в первой половине XXI в. климатические изменения. Это исследование выполнено на основе термодинамического подхода к анализу экологических систем, предложенного Ю.М. Свирежевым.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

С точки зрения термодинамики, растительный покров любой экосистемы является открытой термодинамической системой, так как постоянно происходит процесс обмена энергией и веществом между растительностью и внешней средой, которую составляют атмосфера и почва. Наиболее полной и в то же время обобщенной характеристикой любой термодинамической системы является энтропия этой системы. Энтропия отражает ту часть энергии системы, которая рассеялась, деградировала в тепловой форме и не может быть использована для совершения работы при постоянной температуре (Рубин, 1984). Энтропия имеет основополагающее значение как общий физический показатель состояний вещества и излучения, в том числе и состояний живой природы. Достаточно низкий уровень энтропии является необходимым условием любых форм жизни (Ребане, 1984). Увеличение энтропии означает падение степени упорядоченности и организованности в системе, ее хаотизацию. На основе

обмена энтропии можно дать энергетическую характеристику открытой системы в соответствии со вторым законом термодинамики. Впервые это было сделано бельгийским ученым И. Пригожиным. Его постулат состоит в том, что общее изменение энтропии dS открытой системы может происходить независимо либо за счет процессов обмена с внешней средой d_eS, либо вследствие внутренних необратимых процессов d_iS (Гленсдорф, Пригожин, 1973):

$$dS = d_eS + d_iS. \quad (1)$$

Величина производства энтропии системой d_iS, характеризующая степень необратимости протекающих в этой системе процессов, всегда неотрицательна, так как в любой реальной системе протекают различные внутренние необратимые процессы. При этом $d_iS > 0$, и только если внутренние процессы идут обратимо и равновесно, то $d_iS = 0$. Особенностью биологических систем является то, что в них практически нет обратимых процессов. Все процессы, которые в них протекают, носят необратимый характер, т.е. сопровождаются увеличением энтропии (Рубин, 1984). В открытой системе может происходить как увеличение ее энтропии в результате обмена веществом и энергией с внешней средой, так и отток энтропии от системы во внешнюю среду, т.е. величина d_eS может иметь любой знак. Таким образом, энтропия локальной открытой системы может как возрастать, так и убывать в зависимости от того, каковы связи этой системы с окружающей ее живой и неживой средой. Продукционные процессы в фитоценозах, основанные на притоке свободной энергии света, приводят к уменьшению энтропии фитоценоза $d_eS < 0$, а деструкционные процессы (эвапотранспирация, тепловая диффузия и др.) увеличивают его энтропию $d_iS > 0$. В зависимости от соотношения скоростей изменения d_eS и d_iS общая энтропия растительного покрова dS, как открытой системы, может либо увеличиваться, либо уменьшаться со временем. Однако энтропия системы вместе с окружающей средой всегда увеличивается в соответствии со вторым законом термодинамики.

Растительный покров захватывает энергию солнечного излучения и частично сохраняет ее в виде химической энергии органических соединений, т.е. в превратимых формах. Это свойство растительности, как отмечено в работе Г.Ф. Хильми (1966), ослабляет переход свободной энергии поступающей на поверхность Земли в непревратимые формы и тем самым сдерживает рост энтропии.

Согласно П. Гленсдорфу и И. Пригожину (1973), производство энтропии открытой системой выражается формулой

$$d_iS \approx Q/T, \quad (2)$$

где T – температура и Q – производство рассматриваемой системой тепловой энергии. В работе Свирежева (Svirezhev, 2000) показано, что общая тепловая продукция фитоценоза является результатом двух процессов: дыхания живой биомассы (Q_{res}) и разложения отмершей биомассы (Q_{dec}). Таким образом, формулу (2) можно записать в виде

$$d_iS = (Q_{res} + Q_{dec})/T, \quad (3)$$

где T – средняя температура воздуха за рассматриваемый период. В работе Йоргенсена и Свирежева (Jørgensen, Svirezhev, 2004) из уравнения годового энергетического баланса растительного покрова получено приближенное уравнение

$$Q_{res} + Q_{dec} - GPP \approx 0, \quad (4)$$

где GPP (gross primary production) – общая первичная биологическая продукция фитоценоза. Из уравнения (4) следует, что годовое производство тепловой энергии растительным покровом равно его годовой общей биологической продукции, выраженной в энергетических единицах.

Таким образом, производство энтропии естественным фитоценозом за год (σ) выражается формулой

$$\sigma = d_iS = GPP/T, \quad (5)$$

где T – средняя температура воздуха за вегетационный период в градусах Кельвина, GPP – величина продукции фитоценоза, выраженная в энергетических единицах (Дж/(га · год)).

Обычно естественные фитоценозы рассматриваются как открытые стационарные системы, т.е. общее изменение энтропии для них $dS = 0$. Согласно формуле (1) это означает, что производство энтропии растительным покровом уравновешивается оттоком энтропии из него в окружающую среду:

$$d_iS = | d_eS | = GPP/T.$$

В качестве объекта исследования выбрана территория Европейской России. Зональные фитоценозы рассматриваемой территории, согласно карте растительности для второй половины XX в. (Базилевич, 1993), для представления полученных результатов объединены в следующие типы зональной растительности: тундровые, лесотундровые, лесные (северо-, средне-, южнотаежные темнохвойные и сосновые леса, смешанные и ши-

роколиственные леса), степные (настоящие, сухие степи), лесостепные, полупустынные, пустынные. Большая часть территории Европейской России (около 67%) занята лесными фитоценозами. Среди лесных типов растительности наибольшие площади занимают темнохвойные и сосновые леса – около 47 и 22% соответственно (табл. 1). Среди нелесных типов растительности наибольшие площади занимают настоящая степь и лесостепь – 28 и 20% соответственно. Приведенные в табл. 1 климатические характеристики отражают закономерности размещения рассматриваемых типов растительности в связи с изменениями тепла и влажности.

Общая первичная биологическая продукция определяет скорость, с которой растения трансформируют углекислый газ в органическое вещество. Экспериментальные определения этой величины достаточно сложны, поскольку процессы фотосинтеза и дыхания идут совместно и определение интенсивности фотосинтеза должно сопровождаться изучением темнового дыхания всех частей растения (Кобак, 1988). В то же время, для фитоценозов Европейской России существует обширный банк данных по результатам экспериментальных исследований их первичной биологической продукции (net primary production, NPP). *Первичная биологическая продукция* является показателем интенсивности процесса аккумуляции 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. В данном исследовании использованы значения продуктивности растительного покрова, представленные в работах Н.И. Базилевич, (1993), Биопродукционный … (2001), В.А. Усольцева (2001, 2007). Согласно данным этих работ, для лесных фитоценозов Европейской России (табл. 1) характерно изменение средних значений NPP в диапазоне от 4 т/(га · год) (таежные сосновые леса) до 13.2 т/(га · год) (южнотаежные темнохвойные леса). Среди нелесных фитоценозов этой территории России наименьшие средние значения NPP наблюдаются у тундровых фитоценозов – около 2.7 т/(га · год), а наибольшую среднюю продуктивность имеют лесостепные фитоценозы – около 20 т/(га · год).

Таблица 1. Характеристики зональной растительности и ее ареалов на территории Европейской России для второй половины XX в.: занимаемая площадь (A), значения первичной биологической продукции (NPP), значения общей биологической продукции (GPP), скорость производства энтропии (σ), годовые суммы осадков (P), средние температуры января (T_w) и июля (T_s), средняя температура вегетационного периода (T_{veg})

Тип растительности	A, тыс. км^2	NPP, т/(га·год)	NPP/GPP	GPP, ГДж/(га·год)	P, мм/год	T_w, °C	T_s, °C	T_{veg}, °C	σ, ГДж/(га·К·год)
Тундра	175.3	2.7	0.37	123.4	587.3	–15.9	9.7	8.1	0.4
Лесотундра	68.5	3.3	0.48	113.0	620.7	–14.6	12.3	9.6	0.4
Северотаежные темнохвойные леса	276.6	5.0	0.58	143.4	675.4	–15.0	13.9	10.5	0.5
Среднетаежные темнохвойные леса	381.4	6.5	0.49	219.5	774.4	–13.8	16.6	12.0	0.8
Южнотаежные темнохвойные леса	362.0	13.2	0.45	490.0	762.5	–12.1	17.6	12.6	1.7
Северотаежные сосновые леса	161.7	4.0	0.39	171.0	637.9	–12.5	14.4	10.7	0.6
Средне- и южнотаежные сосновые леса	328.5	3.9	0.39	166.5	763.4	–12.0	17.0	12.2	0.6
Смешанные леса	332.3	13.0	0.38	570.0	757.8	–10.9	18.0	12.8	2.0
Широколиственные леса	345.5	11.4	0.50	379.4	671.3	–10.9	19.7	13.7	1.3
Лесостепь	219.1	19.8	0.48	688.6	648.3	–11.6	20.0	13.8	2.4
Настоящая степь	288.1	15.4	0.50	513.8	565.8	–9.8	22.3	15.1	1.8
Сухая степь	116.9	10.8	0.45	400.2	500.2	–8.1	23.1	15.4	1.4
Полупустыни	96.0	5.9	0.36	271.1	483.0	–6.2	23.9	15.8	0.9
Пустыни	111.8	6.0	0.36	272.6	368.5	–7.9	24.6	16.3	0.9

Таблица 2. Средние изменения характеристик зональной растительности, представленных в табл. 1, при климатических изменениях, связанных с увеличением среднегодовой глобальной температуры воздуха на 1 °С согласно сценариям КМ ИФА РАН и HadCM3

Тип растительности	ΔNPP, т/(га·год)		ΔGPP, ГДж/(га·год)		ΔP, мм/год		ΔT_w, °С		ΔT_s, °С		ΔT_{veg}, °С		$\Delta\sigma$, ГДж/(га·К·год)	
	КМ ИФА РАН	HadCM3	КМ ИФА РАН	HadCM3	КМ ИФА РАН	HadCM3	КМ ИФА РАН	HadCM3	КМ ИФА РАН	HadCM3	КМ ИФА РАН	HadCM3	КМ ИФА РАН	HadCM3
Тундра	0.5	0.2	22.7	9.4	54.8	–50.3	4.4	–0.4	1.4	0.7	0.7	0.4	0.08	0.03
Лесотундра	0.4	0.1	13.9	3.8	40.8	–39.6	2.9	–0.5	1.4	1.1	0.7	0.6	0.05	0.01
Северотаежные темнохвойные леса	0.8	0.5	22.8	14.3	41.0	–38.8	2.7	–0.3	1.4	1.7	0.7	0.9	0.08	0.05
Среднетаежные темнохвойные леса	4.4	1.2	147.9	41.5	39.3	6.9	2.5	0.1	1.5	2.2	0.8	1.3	0.51	0.14
Южнотаежные темнохвойные леса	5.9	–1.2	217.9	–43.8	44.8	28.9	2.4	0.7	1.7	2.3	1.0	1.4	0.75	–0.16
Северотаежные сосновые леса	1.0	0.3	43.6	14.2	41.4	10.3	2.5	0.4	1.3	1.7	0.7	0.9	0.15	0.05
Средне- и южнотаежные сосновые леса	2.9	0.0	124.7	–1.3	42.0	20.3	2.4	0.6	1.5	2.2	0.9	1.3	0.43	–0.01
Смешанные леса	4.6	–0.3	202.1	–12.5	46.9	13.1	2.6	0.9	1.6	2.6	0.9	1.5	0.70	–0.05
Широколиственные леса	–0.1	–2.0	–4.7	–65.6	55.4	0.1	2.8	0.7	1.6	3.1	0.9	1.8	–0.02	–0.24
Лесостепь	–2.3	–2.7	–79.0	–92.9	55.3	13.5	2.8	0.7	1.5	3.3	0.8	1.9	–0.28	–0.34
Настоящая степь	1.3	1.5	42.3	49.7	59.2	29.5	2.6	0.8	1.4	2.9	0.7	1.7	0.14	0.16
Сухая степь	–1.1	1.2	–42.1	43.3	68.9	–7.9	2.7	0.9	1.5	2.5	0.7	1.4	–0.15	0.14
Полупустыни	–0.4	0.7	–20.4	33.7	74.3	–14.5	2.7	1.0	1.6	2.4	0.7	1.3	–0.07	0.11
Пустыни	0.5	1.5	23.1	70.5	82.5	–0.3	2.6	0.9	1.5	2.3	0.8	1.2	0.08	0.24

Первичную продуктивность можно выразить в энергетических единицах. В работах Х.Г. Тооминга (1977) и И.А. Шульгина (2004) показано, что количество энергии, запасенное в первичной биологической продукции, варьирует в пределах от 3 до 5 ккал/г сухой массы. Данные авторов (Базилевич, 1986; Базилевич, Гильманов, 1985; Бобкова и др., 2006; Гильманов, Базилевич, 1983, 1986; Мамаев, Романовский, 2006; Романовский и др., 2004; Цельникер, Молчанов, 2005), изучавших NPP и GPP в отдельных наземных экосистемах, позволяют найти соотношение NPP/GPP для рассматриваемых экосистем (см. табл. 1). Используя эти соотношения можно оценить GPP для рассматриваемых типов зональной растительности на основе данных о значениях NPP.

Для оценки отклика растительного покрова на ожидаемые в первой половине XXI в. климатические изменения использованы результаты расчетов по климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана HadCM3 Центра Хэдли Метеорологической службы Великобритании (Collins et al., 2001) и климатической модели промежуточной степени сложности КМ ИФА РАН, разработанной в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Мохов и др., 2005).

Вероятные изменения растительности на территории Европейской России оценены при потеплении, соответствующем увеличению среднегодовой глобальной температуры воздуха на 1 °С, которое ожидается, согласно рассматриваемым климатическим моделям, в конце 30 – начале 50-х годов текущего столетия. Пространственное изменение климатических характеристик на территории Европейской России при потеплении весьма неоднородно. По сценарию КМ ИФА РАН максимальное потепление следует ожидать в зимние месяцы в среднем на 2.5 °С, в то время как летние температуры воздуха увеличатся в среднем на 1.5 °С. По сценарию HadCM3 температура воздуха для летнего сезона на территории Европейской России может увеличится в среднем на 2.3 °С, при этом для зимних температур воздуха вероятны менее значительные изменения (табл. 2). Оценки изменения количества годовых осадков существенно отличаются. Сценарий КМ ИФА РАН предполагает повышение осадков на всей территории Европейской России. Наибольшее увеличение осадков по этой модели ожидается в засушливых южных районах – на территориях сухой степи, полупустынь и пустынь. Согласно сценарию HadCM3, повышение осадков на рассматриваемой территории ожидается менее значительное, а в ряде северных и южных регионов их количество уменьшится.

Таким образом, используя данные о первичной биологической продукции и формулу (5), можно вычислить величину изменения производства энтропии рассматриваемыми типами зональной растительности. Отклик первичной биологической продукции растительного покрова Европейской России на климатические изменения был оценен с помощью модели, разработанной в Лаборатории математический экологии ИФА РАН (Голубятников, Денисенко, 2001; Голубятников и др., 2005). Основой этой модели является биоклиматическая схема, в которой первичная биологическая продукция NPP (т/(га · год)) растительного покрова представлена в виде непрерывной и однозначно определенной функции от двух переменных – величины радиационного баланса R (ГДж/(м^2 · год)) и значения суммарного испарения E (мм/год). Зависимость NPP от R и E для регионов России приведена на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов показали, что средняя общая первичная биологическая продукция для лесных фитоценозов Европейской России во второй половине XX в. изменялась в диапазоне от 143 ГДж/(га · год) (северные темнохвойные леса) до 570 ГДж/(га · год) (смешанные леса). Среди нелесных фитоценозов этой территории России наименьшие среднее значения GPP наблюдалось у лесотундровых фитоценозов – около 113 ГДж/(га · год), а наибольшая средняя общая продуктивность была характерна для лесостепных фитоценозов – около 689 ГДж/(га · год) (табл. 1).

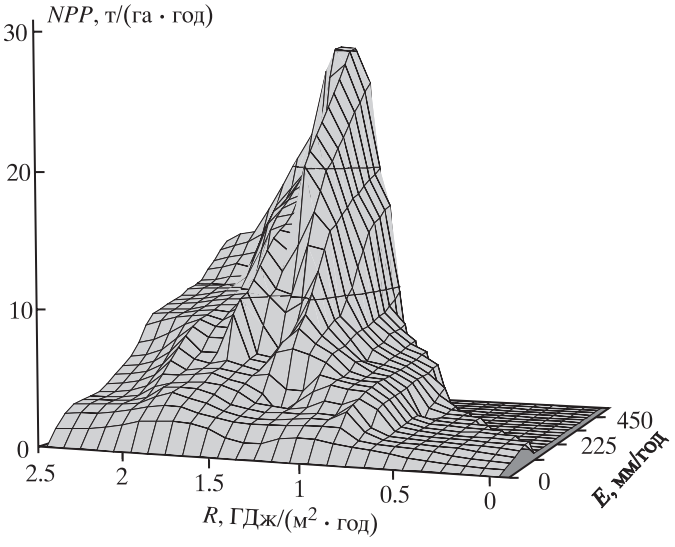


Рис. 1. Зависимость значений первичной биологической продукции (*NPP*) от радиационного баланса (*R*) и суммарного испарения (*E*) для регионов России.

Для восстановленного растительного покрова Европейской России по формуле (5) рассчитаны величины годового производства энтропии по данным для второй половины XX в. (табл. 1). Тундровые и лесотундровые типы растительности характеризуются минимальными значениями этой величины (около 0.4 ГДж/(га · K · год)). Этот факт позволяет предположить, что фитоценозы северных экосистем Европейской России во второй половине XX в. функционировали наиболее оптимально, поддерживая постоянство своих параметров, по сравнению с фитоценозами других экосистем. Годовые значения производства энтропии в диапазоне от 0.5 до 0.9 ГДж/(га · K) характерны для северо- и среднетаежных темнохвойных лесов, таежных сосновых лесов, растительного покрова полупустынь и пустынь. Наибольшие значения этой величины получены для лесостепных фитоценозов (около 2.4 ГДж/(га · K · год)). Этот результат указывает на то, что в этих фитоценозах наиболее интенсивно, по сравнению с другими фитоценозами Европейской России, идут продукционные и деструкционные процессы. В диапазоне от 1.7 до 2.0 ГДж/(га · K · год) лежат значения производства энтропии для фитоценозов южных темнохвойных лесов, смешанных лесов, настоящих степей. Для фитоценозов сухих степей и широколиственных лесов характерны значения производства энтропии в диапазоне 1.3–1.4 ГДж/(га · K · год).

Из широтного распределения величин производства энтропии растительным покровом, по данным второй половины XX в. для Европейской России (рис. 2), следует, что наибольшие значения этой величины (около 1.8 ГДж/(га · K · год)) проявляются в поясе широт около 50.5–55 °с.ш. В этих широтах преимущественно произрастают широколиственные дубовые леса и лесостепные фитоценозы. В широтном диапазоне 55–58 °с.ш., для которого характерны южнотаежные темнохвойные леса в сочетании с широколиственно-хвойными лесами, значения производства энтропии изменяются в пределах 1.5–1.8 ГДж/(га · K · год). В поясе широт от 58 °с.ш. до 61 °с.ш., в котором происходит смена южнотаежных темнохвойных лесов на среднетаежные, наблюдается резкое уменьшение значения производства энтропии до 0.7 ГДж/(га · K · год). Далее к северу до 63 °с.ш. значения производства энтропии практически не изменяются (в этих широтах произрастают, в основном, среднетаежные темнохвойные и сосновые леса). Для пояса широт от 63 °с.ш. до 70 °с.ш., в котором происходит замещение среднетаежных темнохвойных и сосновых лесов северотаежными лесами, а затем в северных широтах – лесотундровыми и тундровыми фитоценозами, получено уменьшение значения годового производства энтропии с 0.7 до 0.3 ГДж/(га · K · год). Южнее 50.5 °с.ш. (до 47.5 °с.ш.) наблюдается уменьшение значений производства энтропии с 1.8 до 1.2 ГДж/(га · K · год). В этом диапазоне широт происходит замещение фитоценозов лесостепи и настоящей умеренно-засушливой степи на фитоценозы настоящих засушливых и сухих степей, а также на фитоценозы полупустынь и пустынь.

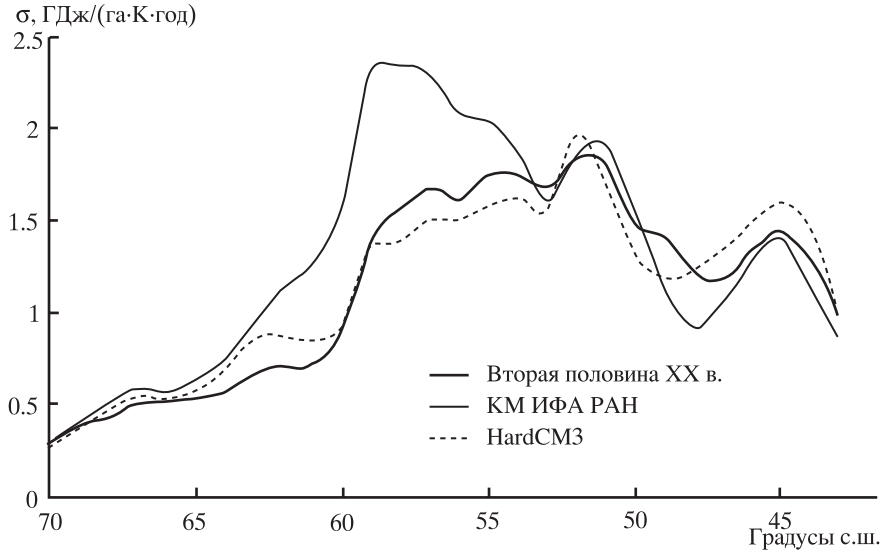


Рис. 2. Широтные распределения значений производства энтропии (σ) растительным покровом территории Европейской России согласно данным для второй половины XX в. и модельным расчетам с использованием климатических сценариев КМ ИФА РАН и HadCM3 для глобального потепления на 1 °C.

Около 45 °с.ш. проявляется дополнительный максимум годового производства энтропии, который обусловлен увеличением площадей высокопродуктивных степных фитоценозов в предгорных районах Северного Кавказа.

Таким образом, на территории Европейской России во второй половине XX в. для наиболее продуктивных фитоценозов характерны наибольшие значения годового производства энтропии. Географическая изменчивость производства энтропии растительностью Европейской России отчетливо следует периодическому закону географической зональности.

В данной работе рассматривается временной период порядка сорока лет. Этого времени не достаточно для изменения рассматриваемых типов зональной растительности. В работах Л.Л. Голубятникова и Е.А. Денисенко (2007, 2009) показано, что за этот период не произойдет значимых сдвигов природных зон. По этим причинам в проведенных расчетах предполагалось, что площади, занимаемые рассматриваемыми типами растительности, останутся неизменными в течение анализируемого периода.

Широтные распределения возможных значений производства энтропии растительным покровом Европейской России при глобальном потеплении на 1 °С, полученные с использованием климатических сценариев КМ ИФА РАН и HadCM3, представлены на рис. 2. Существенные изменения значений производства энтропии на этой территории получены севернее примерно 53.5 °с.ш. – вплоть до субполярных широт. Согласно климатическому сценарию КМ ИФА РАН, для этого широтного диапазона получено значительное увеличение производства энтропии фитоценозами при ожидаемом потеплении, что указывает на возможность формирования в этих широтах более сложных по энергетической структуре фитоценозов. По сценарию HadCM3 значения производства энтропии растительного покрова увеличиваются в 60-х широтах и уменьшаются в более южных широтах этого пояса по сравнению со значениями этой величины для второй половины XX в. В широтной зоне 47.5–49.5 °с.ш. для проанализированных климатических сценариев получено снижение значений производства энтропии фитоценозами рассматриваемой территории. Южнее 47.5 °с.ш. при климатических изменениях, согласно КМ ИФА РАН, в отличие от HadCM3, возможно уменьшение значений производства энтропии растительным покровом по сравнению с аналогичными значениями полученными для второй половины XX в. Следует отметить, что для районов, расположенных севернее 49 °с.ш., за исключением узкого диапазона широт 51.5–52.5 °с.ш., полученные оценки возможных значений производства энтропии растительным покровом по климатическому сценарию КМ ИФА РАН превосходят оценки полученные по сценарию HadCM3.

Согласно сделанным оценкам с использованием различных модельных сценариев глобального среднегодового потепления на 1 °С, можно ожидать значительного изменения энергетической структуры растительного покрова в достаточно протяженном поясе широт территории Европейской России. В то же время для рассматриваемой территории следует отметить существенные региональные различия возможных структурных перестроек растительного покрова при разных модельных сценариях климатических изменений.

Под воздействием ожидаемых климатических изменений годовое производство энтропии тундровыми фитоценозами, которые занимают около 175 тыс. км^2 территории Европейской России, увеличится на 7–18% (см. табл. 2). Лесотундровые фитоценозы, произрастающие на площади около 69 тыс. км^2, увеличат производство энтропии на 3–12%. Незначительные изменения годового производства энтропии указанными фитоценозами свидетельствует о том, что под воздействием рассматриваемых сценариев климатических изменений в этих фитоценозах, в основном, не будет существенных структурных перестроек.

Для лесных фитоценозов Европейской России, занимающих около 2200 тыс. км^2 ее территории, ожидаемые климатические изменения не повлекут катастрофических изменений в их видовом составе (Голубятников, Денисенко, 2007), хотя, как отмечают ряд исследователей (Исаев, Коровин, 2006), могут привести к увеличению частоты и площади лесных пожаров. В северотаежных темнохвойных лесах вероятно незначительное увеличение ежегодного производства энтропии от 10% (оценка по сценарию HadCM3) до 16% (оценка по сценарию КМ ИФА РАН). По этой причине в лесах этого типа возможно не существенное изменение их горизонтальной структуры. Сценарий КМ ИФА РАН предполагает значительное увеличение производства энтропии в средне- и южнотаежных темнохвойных лесах до 67 и 44% соответственно, в смешанных лесах до 35%. По этому климатическому сценарию вероятно существенное (до 74%) увеличение годового производства энтропии средне- и южнотаежными сосновыми лесами. Увеличение

производства энтропии в лесах этих типов указывает на возможное ускорение в них сукцессионных процессов, в результате которых вероятны структурные изменения фитоценозов этих типов лесов. По сценарию HadCM3 изменения в среднетаежных темнохвойных лесах и северотаежных сосновых лесах будут происходить менее интенсивно, о чем свидетельствуют низкие значения годового производства энтропии этими типами растительности – 18 и 8% соответственно. Для широколиственных лесов получено снижение годового производства энтропии от 2% (оценка по сценарию КМ ИФА РАН) до 18% (оценка по сценарию HadCM3). По сценарию HadCM3 снижение производства энтропии ожидается также южнотаежными темнохвойными лесами до 10%, средне- и южнотаежными сосновыми лесами до 1% и смешанными лесами до 3%. Уменьшение производства энтропии в этих типах лесов указывает на повышение их структурно-энергетической организации.

Отклик степных фитоценозов, занимающих около 400 тыс. км^2 территории Европейской России, на ожидаемое потепление климата будет различен. Для фитоценозов настоящей степи, вероятно, незначительное увеличение производства энтропии на 8–9%, что свидетельствует о слабой изменчивости этих фитоценозов при ожидаемом потеплении. Исходя из сценария КМ ИФА РАН, получено понижение годового производства энтропии фитоценозами сухих степей до 11%, в то время как по сценарию HadCM3 для этих фитоценозов ожидается повышение производства энтропии на 10%. В лесостепных фитоценозах, произрастающих на площади около 220 тыс. км^2, уменьшится ежегодное производство энтропии на 12–14%. Этот факт указывает на то, что предстоящие изменения климатических параметров повлекут снижение интенсивности сукцессионного процесса в степных фитоценозах и изменение объема экологических ниш ряда видов степной растительности.

В полупустынных фитоценозах Европейской России, занимающих около 100 тыс. км^2 ее территории, согласно рассматриваемым сценариям климатических изменений будут происходить незначительные изменения. По сценарию КМ ИФА РАН для этих фитоценозов получено понижение годового производства энтропии до 8%, в то время как по сценарию HadCM3 возможно повышение этой величины до 12%.

Ожидаемое потепление климата приведет к изменениям пустынных фитоценозов, занимающих около 112 тыс. км^2 территории Европейской России. Годовое производство энтропии этими фитоценозами возрастет от 8% (оценка по сценарию КМ ИФА РАН) до 25% (оценка по сценарию HadCM3). Таким образом, ожидается, что ряде пустынных фитоценозов изменятся их структурные характеристики, увеличится комплексность растительного покрова.

В работах Свирежева (Svirezhev, 2000; Jørgensen, Svirezhev, 2004) показано, что годовое производство тепловой энергии растительным покровом равно его годовой общей биологической продукции, выраженной в энергетических единицах. Анализ зависимости между значениями годовых производств энтропии (σ) и тепловой энергии (Q) растительным покровом Европейской России (рис. 3) показал, что во второй половине XX в. величина σ изменялась в пределах от 0.2 до 2.5 ГДж/(га · K · год) в год при изменении величины Q от 45 до 707 ГДж/(га · год). При рассматриваемых сценариях климатических изменений для растительности Европейской России будут характерны расширения диапазонов изменения этих величин. Согласно сценарию HadCM3, ожидается, что σ будет изменяться от 0.1 до 3.3 ГДж/(га · K · год) в год при изменении величины Q от 15 до 964 ГДж/(га · год). По сценарию КМ ИФА РАН вероятны изменения σ от 0.1 до 4.1 ГДж/(га · K · год) при изменении величины Q от 36 до 1159 ГДж/(га · год).

Зависимость изменения годового производства энтропии ($\Delta\sigma$) зональными фитоценозами Европейской России при рассматриваемых сценариях климатических изменений по сравнению с расчетами для второй половины XX в. от величины производства тепловой энергии этими фитоценозами можно описать набором линейных функций в границах области изображенной на рис. 4. Если для фитоценоза на некоторой территории величина $\Delta\sigma$ положительна, то происходит разрушение энергетической структуры этого фитоценоза на данной территории, которое может выражаться, например, в росте первичной биологической продукции, изменении механизмов саморегуляции фитоценоза, увеличении площади листовой поверхности, перераспределении ассимилятов растений, что приведет к изменению в соотношении надземной и подземной биомассы фитоценоза. Отрицательное значение $\Delta\sigma$ указывает на тот факт, что в фитоценозе происходит структуризация, которая может характеризоваться, например, уменьшением первичной биологической продукции, увеличением мозаичности ареала, сокращением сомкнутости крон, уменьшением плотности растительного покрова, сокращением численности произрастающих видов растений.

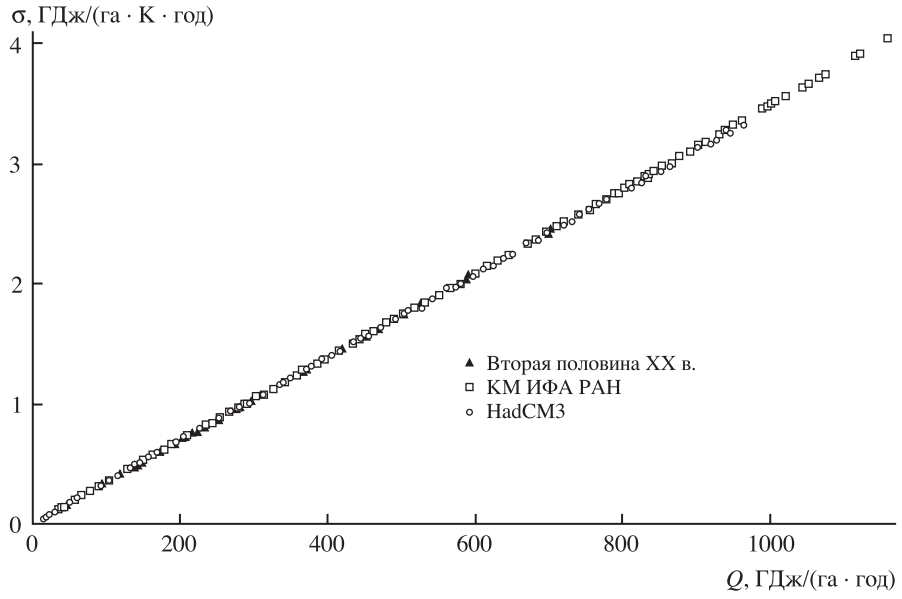


Рис. 3. Зависимость между значениями производства энтропии (σ) и производства тепловой энергии (*Q*) растительным покровом территории Европейской России согласно данным для второй половины XX в. и модельным расчетам с использованием климатических сценариев КМ ИФА РАН и HadCM3 для глобального потепления на 1 °С.

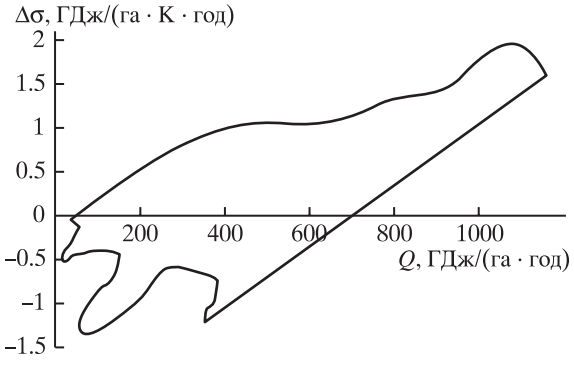


Рис. 4. Границы области изменения прироста производства энтропии (Δσ) фитоценозами, произрастающими на территории Европейской России, в зависимости от величины производства тепловой энергии (*Q*) этими фитоценозами согласно модельным расчетам с использованием климатических сценариев КМ ИФА РАН и HadCM3 для глобального потепления на 1 °С.

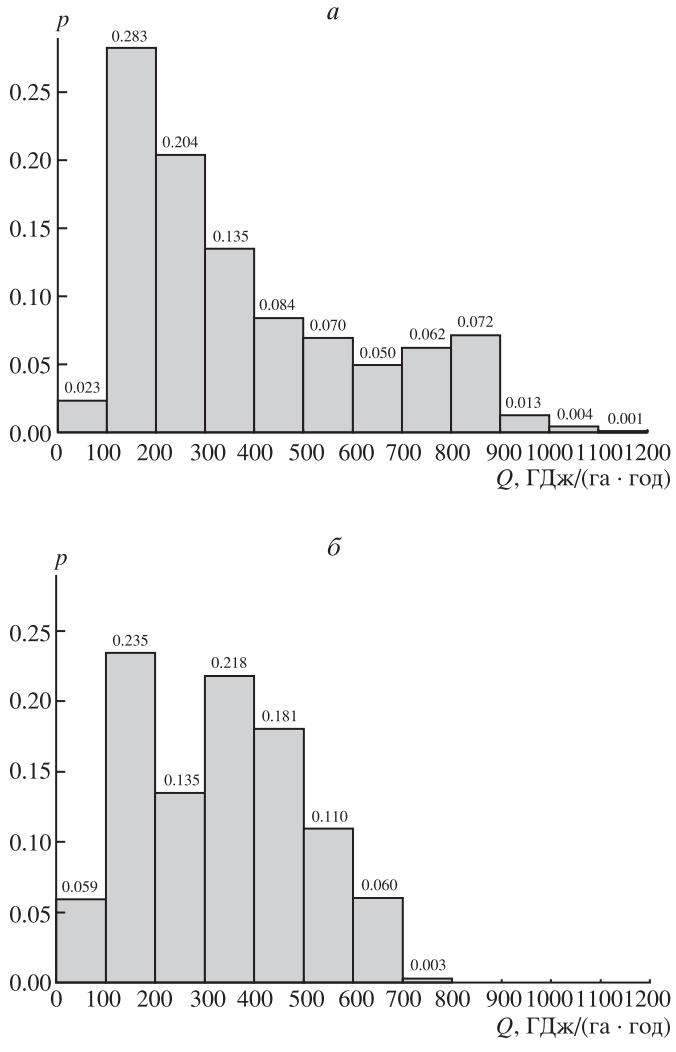


Рис. 5. Гистограммы относительной частоты попадания (*p*) положительных (*а*) и отрицательных (*б*) значений изменения производства энтропии фитоценозами в интервалы производства ими тепловой энергии (*Q*) для территории Европейской России.

Получить представление о распределении положительных и отрицательных значений изменения годового производства энтропии фитоценозами рассматриваемой территории в зависимости от производства этими фитоценозами тепловой энергии можно из гистограмм, приведенных на рис. 5. Частота положительных значений $\Delta\sigma$ (рис. 5, *а*) имеет наибольшее значение в интервале изменения величины Q от 100 до 200 ГДж/(га·год). В интервале изменения величины Q от 800 до 900 ГДж/(га·год) частота положительных значений $\Delta\sigma$ имеет дополнительный максимум. Частота отрицательных значений изменения годового производства энтропии фитоценозами (рис. 5,*б*) имеет максимальные значения в интервалах изменения величины Q 100–200 и 300–400 ГДж/(га·год). Полученные виды гистограмм связаны с различной реакцией фитоценозов, слагающих каждый из рассматриваемых типов зональной растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье для территории Европейской России на основе термодинамического подхода проанализированы возможные изменения зональных фитоценозов при потеплении, соответствующем повышению среднегодовой глобальной температуры воздуха на 1 °С согласно моделям КМ ИФА РАН и HadCM3. Рассмотренная в данной работе величина годового производства энтропии растительного сообщества является комплексной, универсальной мерой, которая позволяет сравнивать фитоценозы с разным видовым составом.

Производство энтропии растительным покровом Европейской России во второй половине XX в. оценено в 1.2 ГДж/(га·К·год). Согласно полученным результатам, при рассматриваемых сценариях климатических изменений возможно как уменьшение на 1% этой величины (оценка по сценарию HadCM3), так и ее увеличение до 22% (оценка по сценарию КМ ИФА РАН). Полученные оценки изменения значений производства энтропии растительным покровом Европейской России позволяют сделать вывод, что на рассматриваемой территории вероятны существенные изменения в структуре растительного покрова в протяженном поясе широт. Заметны существенные региональные различия возможных изменений значений производства энтропии при разных модельных сценариях климатических изменений. В частности, для ряда рассматриваемых регионов отмечены изменения значений годового производства энтропии растительным покровом разного знака, при этом в широтном диапазоне 48–49.5 °с.ш. для проанализированных климатических сценариев получено снижение величины этого параметра растительности по сравнению с результатами расчетов по данным для второй половины XX в.

При рассматриваемых сценариях климатических изменений для растительности Европейской России возможны расширения диапазонов изменения годового производства тепловой энергии на 43–70%, годового производства энтропии на 39–74% по сравнению с данными второй половины XX в.

Анализ зависимостей изменения годового производства энтропии зональными фитоценозами Европейской России при рассматриваемых сценариях климатических изменений от величины производства этими фитоценозами тепловой энергии показал, что фитоценозам рассматриваемой территории с производством тепловой энергии, превосходящим 700 ГДж/(га·год), свойственны только положительные изменения годового производства энтропии. Гистограммы распределения положительных и отрицательных значений изменения годового производства энтропии фитоценозами рассматриваемой территории по производству ими тепловой энергии имеют по два максимума.

Естественные фитоценозы при слабо меняющихся условиях окружающей среды находятся в квазиравновесных состояниях, для которых характерны определенные скорости процессов аккумуляции и деструкции органического вещества. Эти процессы позволяют фитоценозам, как всяким живым организмам, поддерживать минимальный уровень скорости возрастания их энтропии. Изменение климатических параметров приведет к изменению продукционных и деструкционных процессов в растительном покрове и, как следствие этого, к изменению скорости производства энтропии фитоценозами, что в свою очередь изменит степень устойчивости того или иного фитоценоза. Расчеты изменений годовых производств энтропии зональными фитоценозами Европейской России при различных климатических сценариях позволяют выявить вероятные тренды предстоящих изменений структуры растительного покрова.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН «Физические и химические процессы в атмосфере и на земной поверхности, определяющие изменения климата».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.В., 1976. Биофизика сообществ живых организмов // Успехи физ. наук. Т. 120. № 12. С. 647–676.

Базилевич Н.И., 1986. Структура и функционирование природных экосистем // Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука. С. 5–31.

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

Базилевич Н.И., Гильманов Е.Г., 1985. Концептуально-балансовые модели экосистем как этап обобщения экологической информации при построении математических моделей // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. VII. Л.: Гидрометеоиздат. С. 152–178.

Биопродукционный процесс в лесных экосистемах севера, 2001 / Под ред. Бобковой К.С., Галенко Э.П. СПб.: Наука. 278 с.

Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Кузин С.Н., 2006. Углеродный цикл в еловых экосистемах северной тайги // Экология. № 1. С. 23–31.

Веневский С.В., 1991. Энтропия как функция состояния биосферы // Журн. общ. биологии. Т. 52. № 6. С. 900–915.

Гильманов Е.Г., Базилевич Н.И., 1983. Концептуальная балансовая модель круговорота органического вещества в экосистеме как теоретическая основа мониторинга // Теоретические основы и опыт экологического мониторинга. М.: Наука. С. 7–57.

Гильманов Е.Г., Базилевич Н.И., 1986. Построение и анализ моделей экосистем // Моделирование геосистем. М.: Мысль. С. 55–96.

Гленсдорф П., Пригожин И., 1973. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир. 280 с.

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

Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А., 2007. Модельные оценки влияния изменений климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России // Изв. РАН. Сер. биол. №2. С. 212–228.

Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А., 2009. Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России // Изв. РАН. Сер. геогр. № 2. С. 57–68.

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

Изаков М.Н., 1997. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах // Успехи физ. наук. Т. 167. № 10. 1087–1094.

Исаев А.С., Коровин Г.Н., 2006. Леса России и Киотский протокол // Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. Проблема Киотского протокола. М.: Наука. С. 287–305.

Кобак К.И., 1988. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоиздат. 248 с.

Мамаев В.В., Романовский М.Г., 2006. Биогеоценотические подходы к изучению дубрав лесостепи // Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении. М. Наука. С. 105–118.

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

Приц А.К., 1974. Принцип стационарных состояний открытых систем и динамика популяций. Калининград: Балт. НИРО. 123 с.

Ребане К.К., 1984. Энергия, энтропия, среда обитания. Таллин: Валгус. 159 с.

Романовский М.Г., Мамаев В.В., Гопиус Ю.А., 2004. Углеродный цикл // Экосистемы Теллермановского леса. М.: Наука. С. 141–158.

Рубин А.Б., 1984. Термодинамики биологических процессов. М.: Изд-во МГУ. 283 с.

Свирежев Ю.М., 1976. Вито Вольтерра и современная математическая экология // Математическая теория борьбы за существование / Под ред. Вольтерра В. М.: Наука. С. 245–286.

Свирежев Ю.М., 1991. Феноменологическая термодинамика взаимодействующих популяций // Журн. общ. биологии. Т. 52. № 6. С. 840–854.

Тооминг Х.Г., 1977. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеоиздат. 200 с.

Усольцев В.А., 2001. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН. 708 с.

Усольцев В.А., 2007. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН. 636 с.

*Хильми Г.Ф.,*1966. Основы физики биосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 300 с.

Цельникер Ю.Л., Молчанов А.Г., 2005. Соотношение нетто- и гросс-продукции и газообмен CO_2 в высокопродуктивных сосняках и березняках // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XX. СПб.: Гидрометеоиздат. С. 174–190.

Шульгин И.А., 2004. Лучистая энергия и энергетический баланс растений. М.: Альтекс. 142 с.

Collins M., Tett S.F.B., Cooper C., 2001. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley

Centre coupled model without flux adjustments // Clim. Dyn. V. 17. P. 61–81.

Jørgensen S.E., 1997. Integration of Ecosystem Theories: A Pattern. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ. 388 p.

Jørgensen S.E., Svirezhev Y.M., 2004. Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Amsterdam: Elsevier. 366 p.

Kerner E.H., 1957. Statistical mechanics of interacting biological species // Bull. Math. Biophys. V. 19. P. 121–146.

Morovitz H.J., 1970. Entropy for Biologists: an introduction to thermodynamics. New York; London: Acad. Press. 195 p.

Svirezhev Yu.M., 1998. Thermodynamic Orientors: How to Use Thermodynamic Concepts in Ecology? // Eco Targets, Goal Functions and Orientors / Eds Müller F., Leupelt M. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 102–122.

Svirezhev Yu.M., 2000. Thermodynamics and Ecology // Ecological Modelling. V. 132. P. 11–22.

Svirezhev Yu., 2001a. Thermodynanics and Theory of Stability // Thermodynamics and Ecological Modelling / Ed. Jørgensen S.E. Boca Raton: CRC Press. P. 117–132.

Svirezhev Yu., 2001b. Thermodynanics of the Biosphere // Thermodynamics and Ecological Modelling / Ed. Jørgensen S.E. Boca Raton: CRC Press. P. 349–364.

Svirezhev Y.M., Svirejeva-Hopkins A., 1997. Sustainable biosphere: critical overview of basic concept of sustainability // Ecological Modelling. V. 106. P. 47–61.

Thermodynamic approach to estimating climate change impacts on the vegetation cover

L. L. Golubyatnikov[1], E. A. Denisenko [1,2]

[1]Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences
119017 Moscow, Pyzhevsky per., 3
[2]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences
119017 Moscow, Staromonetny per., 29
e-mail: golub@ifaran.ru

Possible changes of zonal phytocenoses for the territory of European Russia under a 1 °C increase in the annual mean global surface temperature are analyzed from a thermodynamic point of view. Outputs of the atmosphere-ocean general circulation model HadCM3 (Met Office Hadley Centre, United Kingdom) and the intermediate-complexity climate model developed at the Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, are used. Model estimates of the annual entropy production by the vegetation cover for the territory under study are obtained for the second half of the 20th century. Changes in the annual entropy production are estimated under possible warming.