Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века

Т.Б. Титкова, В.В. Виноградова

Институт географии РАН
Москва, 119017, Россия
E-mail: ttitkova@yandex.ru

В работе оценивается воздействия изменения климата на природные экосистемы в северных ландшафтах России. В основу положено представление о том, что условия существования определенного биома определяется главным образом теплообеспеченностью в вегетационный период, суровостью зим и гидротермическим фактором. Установлено, что в начале XXI века на Европейской части России и в Западной Сибири в бореальных и субарктических ландшафтах максимальное увеличение индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы наблюдается в зоне тундр и лесотундр. На Европейской части изменения произошли за счет увеличения теплообеспеченности как в летний, так и в зимний период, а также более раннего начала вегетации. В Западной Сибири отмечалось суммарное воздействие увеличения теплообеспеченности и уменьшения влагообеспеченности. Отклик растительности на изменение климатических условий оценивался по спутниковым данным. Показано, что в тундре увеличение вегетационного индекса, которое отражает увеличения биомассы и фотосинтетической активности, может сопровождаться разнонаправленным трендом альбедо на соседних участках. Это может свидетельствовать о большой вероятности потери целостности и активности биома.

Ключевые слова: изменения климата, теплообеспеченность, влагообеспеченность, природные экосистемы, NDVI, альбедо

Введение

Наблюдаемое потепление климата на большей части нашей планеты приводит к изменениям в составе, структуре и функционировании растительных экосистем, особенно в тех областях, где тепло и влага являются лимитирующими факторами существования растительности (Climate Change, 2002; Эколого-географические, 2011; Анисимов, 2011). В этих наиболее уязвимых переходных природных ландшафтах возможно смещение границ растительных сообществ (Анисимов, 2011; Замолодчиков, 2011; Виноградова и др., 2015). Изменения в составе растительности смогут проявиться прежде всего в составе трав и подроста деревьев (Величко, 2002; Зеликсон, 2010; Семенов 2012), т.к. реальные сдвиги границ хвойно-широколиственных лесов и их ареалов достаточно малы. Увеличение продуктивности растительности при потеплении, если не сопровождается изменением видового состава, не является существенным изменением, поскольку оно полностью обратимо при возврате к фоновому климатическому режиму. Если же в результате воздействия меняются доминантные для данного региона виды и возникает новый биом, то уровень воздействия следует считать критическим, поскольку из-за гистерезиса для возврата в прежнее состояние недостаточно вернуть климатические характеристики к их исходным значениям (Gonsalez, 2010). По ряду оценок (Анисимов, 2011; Forbes, 2010) уже в первой четверти XXI века климатическое воздействие на экосистемы достигнет критического уровня на большей части бореальной зоны ЕТР и в Западной Сибири.

В районах, где теплообеспеченность является основным лимитирующим фактором увеличения биомассы, имеет место высокая корреляция между теплообеспеченностью

и вегетационным индексом (NDVI), который связан с наземной фотосинтетически активной фитомассой. Отклик биома может проявляться в увеличении биомассы и фотосинтетической активности, за счет чего и происходит увеличение вегетационного индекса NDVI при сохранении неизменным видового состава биомов. В случае же, если теплообеспеченность находится вблизи границ допустимого для существующих биомов диапазона (например, на границе тундры), происходят принципиально иные изменения, при которых биом теряет свою целостность и вступает в конкуренцию с привнесенными видами, ранее не встречавшимися на данной территории. В результате возникают новые биомы с существенно отличными свойствами, в том числе и оптическими (альбедо) (Анисимов, 2011).

Зональность растительности определяется, главным образом, теплообеспеченностью в вегетационный период, суровостью зим и гидротермическими условиями, характеризующим соотношение увлажнения и испарения. При этом во многих работах отмечается, что для северных районов основным фактором является температурный (Кислов и др., 2008; Оценочный доклад…, 2008; Второй оценочный доклад…, 2014).

Цель работы – выявить районы севера России на Европейской части и в Западной Сибири, где изменения климата повлияли на природные экосистемы бореальных и субарктических ландшафтов. А также попытаться оценить реакцию растительного компонента ландшафтов на изменения условий тепло- и влагообеспеченности в начале XXI века по данным спутниковых наблюдений и по изменению отражательных свойств поверхности, выраженных вегетационным индексом (NDVI) и альбедо.

Материалы и методика

Исследования проводились на субарктических (тундровых и лесотундровых) и бореальных (северотаежных и среднетаежных) ландшафтах Европейской территории России и Западной Сибири севернее 60° с.ш., представленных зонами тундры, лесотундры, северной и средней тайги. Анализ проводился для летних условий. Привлечение архивных метеорологических данных позволяет проводить анализ климатических изменений, а система дистанционного мониторинга дает возможность оценивать тренды изменения свойств подстилающей поверхности, в частности – растительного покрова, для крупных территориальных единиц.

В основу оценки уровня изменения климата и его воздействия на природные экосистемы положено представление о том, что условия существования определенного биома определяется, главным образом, теплообеспеченностью в вегетационный период, суровостью зим и влагообеспеченностью, варьирующих в определенных пределах. Для количественного описания этих факторов были использованы три климатические индекса, которые ранее применялись в работе (Анисимов, 2011): 1) для оценки изменения теплообеспеченности использовалась сумма температур выше +5 °C, характеризующая температурный режим вегетационного периода, которая рассчитывались как сумма среднесуточных температур за те дни, когда они превышали установленный порог +5 °C; 2) сумма температур ниже 0°C,

характеризующая суровость зим, рассчитывалась на основании суммы отрицательных температур; 3) индекс сухости, равный отношению суммы температур выше +5 °С к годовому количеству осадков. В дополнение анализировалось изменение даты начала вегетационного сезона при устойчивом переходе среднесуточных температур через +5 °С. Эти параметры были рассчитаны по данным метеорологической сети климатического архива ВНИИГМИ-МЦД (http://www.meteo.ru) на основании 97 станций. Расчет климатических индексов проводился для рекомендованного ВМО базового периода: 1961–1990 гг. Современные тенденции климатических изменений были получены при сравнении базового и современного (2000–2012 гг.) периодов.

Для расчета индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы использовалась функция изменения средних значений выше перечисленных климатических характеристик, оцененная следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n=3} \frac{(I_i - \overline{I_i})^2}{\overline{I_i^2}}.$$

Здесь $\overline{I_i}$ – значения параметров за базовый период 1961–1990 гг., I_i – значения параметров за 2000–2012 гг. Расчет климатического индекса производился отдельно для каждой ландшафтной зоны. Формула отражает тот факт, что чем больше индекс, тем больше вероятность влияния изменения климата на биом.

Анализ наземных данных был дополнен спутниковой информацией, которая позволяет оценивать происходящие изменения природных ландшафтов на современном этапе. В качестве спутниковой информации анализировались данные MODIS Центра LP DAAC NASA за период 2000–2013 гг., включающие вегетационный индекс NDVI (модель MOD13C1 по данным MODIS/Terra), альбедо Al (модель MCD43C1 по данным спутников MODIS/Terra + Aqua BRDF/Albedo), имеющие разрешение в сетке 0,05°×0,05° с дискретностью 16 дней (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products).

Вегетационный индекс (NDVI) представляет собой нормированную разность альбедо подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной области спектра и является индикатором фотосинтетической активности растительности.

Наблюденные климатические параметры, на основе которых был рассчитан индекс уровня воздействия изменения климата на природные экосистемы, были взяты из станционных данных и приведены к единой градусной сетке 1°×1°, которая наиболее оптимально отображает климатические изменения без большой потери точности информации. Распределение климатических параметров внутри этой градусной сетки также не однородно (в особенности осадков), что в ряде других факторов влияет на неоднородность NDVI и альбедо. Поэтому, чтобы оценить отклик растительности на климатические изменения, происходящие в природных зонах в целом от северной тайги до арктических пустынь, и уловить влияние изменения климата на природные ландшафты, была проведена генерализация спутниковой информации. Данные были переведены на сетку 1°×1° (как и климатические данные) и определено их сред-

нее значения за летний период. В результате в работе была проведена оценка изменений NDVI и альбедо на крупномасштабных объектах, таких как ландшафтная зона.

Максимальные показатели отражательной способности растительности могут сильно варьировать в отдельные годы в зависимости от погодных условий отдельного вегетационного сезона. Чтобы нивелировать влияние аномалий отдельных лет и оценить проявление общих климатических тенденций в изменении среднего состояния растительности в вегетационный период, были рассмотрены средние значения отражательной способности растительности за вегетационный период в течении 14-ти лет (2000–2013 гг.).

В качестве меры интенсивности изменений отражательной способности поверхности в начале XXI века использовался коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменений за интервал времени 2000–2013 гг. Для оценки статистической значимости тренда использовался ее 95% уровень по критерию Стьюдента.

Дополнительно, изменение лесной растительности оценивалось по картам потери и увеличения лесной растительности, разработанных Университетом штата Мэриленд США по данным Landsat. В основе этих оценок лежат карты сомкнутости лесного покрова по состоянию на 2013 год относительно 2000 года (University of Maryland, 2014).

Основные результаты и их обсуждение

Оценки критических уровней изменения климата

Как уже отмечалось выше, в бореальных ландшафтах тепло и влага являются лимитирующими факторами существования растительности. Коэффициент корреляции между суммой температур выше +5° С и вегетационным индексом на севере Европейской части России и в Западной Сибири составляет 0,85. Анализ изменения теплообеспеченности для бореальных и субарктических ландшафтов показал, что в начале XXI века на всей территории отмечается рост суммы температур выше +5° С по сравнению со среднемноголетними условиями 1961–1990 гг. (*рис. 1*). Наибольшее увеличения суммы температур выше +5° С на 150°–200° С произошло на Европейской части России во всех климатических зонах. Максимальный рост (более 200 °С) наблюдался в лесотундровой и тундровой зонах Кольского полуострова и в таежной зоне, западнее р. Северная Двина. В Западной Сибири рост суммы температур выше +5° С в тундровой зоне меньше, чем на Европейской части – 100°–150° С. Наименьшие изменения произошли на западе Ямала и Гыданском полуострове. В лесотундровой и таежной зонах увеличение суммы температур выше +5° С варьирует в пределах от 150° до 200° С с максимумом в среднем течении р. Оби (больше 200° С). При этом превышение диапазона изменения этого параметра для среднемноголетних условий наблюдается только в лесотундровой зоне на ЕТР и северо-таежной зоне Западной Сибири. Для остальных субарктических и бореальных ландшафтов как на ЕТР, так и в Западной Сибири суммы температур выше +5 °С близки к максимальным значениям для среднемноголетних условий (*табл. 1*).

Таблица 1. Изменение тепло- и влагообеспеченности ландшафтных зон в начале XXI века по сравнению со среднемноголетними условиями на Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (ЗС)

Ланд-шафтная зона		*Сумма температур выше +5 °С*				*Сумма отрицательных температур*				*Сумма осадков за год, мм*			
		1961–1990			*2000–2012*	*1961–1990*			*2000–2012*	*1961–1990*			*2000–2012*
		min	*сред.*	*max*	*сред.*	*min*	*сред.*	*max*	*сред.*	*min*	*сред.*	*max*	*сред.*
Тундра	ЕТР	762	982	1161	1153	–2406	–1705	–999	–1450	279	439	620	450
	ЗС	436	766	1049	897	–4735	–3901	–2484	–3562	253	398	602	365
Лесо-тундра	ЕТР	1090	1222	1292	**1383**	–2405	–1663	–1022	–1425	291	457	608	504
	ЗС	968	1127	1278	1282	–4783	–3999	–3073	–3829	338	454	702	516
Сев. тайга	ЕТР	1188	1493	1846	1669	–2520	–1732	–985	–1461	363	524	716	552
	ЗС	1237	1403	1527	**1570**	–4480	–3604	–2511	–3466	316	507	699	524
Сред. тайга	ЕТР	1655	1890	2085	**2102**	–2347	–1579	–999	–1318	432	613	818	639
	ЗС	1579	1784	2059	1955	–3452	–2653	–1633	–2476	360	544	735	576

Следует отметить, что, наряду с ростом суммы температур выше +5 °С, на всей рассматриваемой территории наблюдается устойчивый сдвиг на более ранние сроки (8–12 дней) начала вегетационного сезона, т.е. устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через +5 °С (*табл. 2*). Максимальные изменения отмечаются для лесотундры и северной тайги. Более ранние сроки начала вегетации приводят к значимому росту NDVI (т.е. положительной динамике растительности).

Таблица 2. Изменение дат устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через +5 °С

Ландшафтная зона	*Тундра*		*Лесотундра*		*Северная тайга*		*Средняя тайга*	
Район	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС
1961–1990	19,06	1,07	6,06	17,06	27,05	6,06	7,05	21,05
2000–2012	11,06	26,06	26,05	9,06	18,05	29,05	3,05	15,05

Во всех ландшафтных зонах наблюдается уменьшение суммы отрицательных температур, но не превосходящие диапазон их изменения для среднемноголетних условий (*табл. 1*). На Европейской территории России максимальное уменьшение суммы отрицательных температур произошло в тундровой и таежной зонах. В Западной Сибири это уменьшение не столь значительно, но максимальные изменения также отмечаются в тундровой зоне.

Анализ изменений среднегодовых сумм осадков показывает, что их значения в начале XXI века не превышают среднемноголетних (*табл. 1*). Во всех ландшафтных зонах суммы

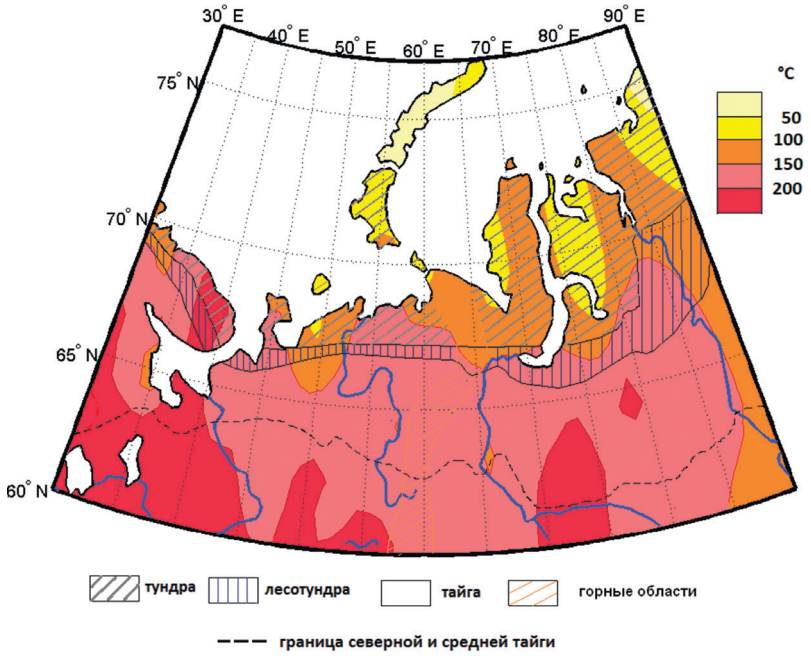

Рис. 1. Изменение суммы температур выше +5 °С в 2000–2012 гг. относительно 1961–1990 гг.

осадков находятся в пределах среднемноголетней изменчивости базового периода. Практически везде происходит увеличение суммы осадков, кроме лесотундровой зоны Западной Сибири, где отмечается некоторое уменьшение сумм осадков.

На основе расчета индекса уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы (формулу см. выше) была построена соответствующая карта (*рис. 2*). На Европейской части значительное изменение климатического индекса прослеживается в основном в тундровой зоне. Это тундры Кольского полуострова, полуострова Канин, Малоземельская тундра, о. Вайгач и арктические тундры Новой Земли. В лесотундровой зоне заметное изменение климатического индекса наблюдается лишь на побережье Мезенской губы, а в зоне северной тайги – в районе Онеги. Увеличение индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы на Европейском севере произошло в основном за счет увеличения теплообеспеченности в летний и зимний период. На остальной территории суммарный фактор климатических воздействий на биомы достаточно низок.

В Западной Сибири, как и на Европейской территории России, критичность изменения климата для ландшафтов заметна в основном в тундровой зоне, но на более обширных площадях. В тундрах Ямала, Гыданского полуостровов и на Таймыре значительное влияние изменения климата на ландшафты достигнуто благодаря суммарному фактору, где, на фоне сравнительно небольшого увеличения теплообеспеченности и уменьшения сумм осадков, влияние изменения климата на природные экосистемы достигает максимума. В лесотундровой зоне Западной Сибири заметное влияние изменения климата на растительность наблюдается в южной части Обской губы и в верхнем течении Енисея, где главную роль сыграло увеличение теплообеспеченности как летом, так и зимой (*табл. 1*). В зоне северной и средней тайги влияние изменения климата на природные экосистемы минимально.

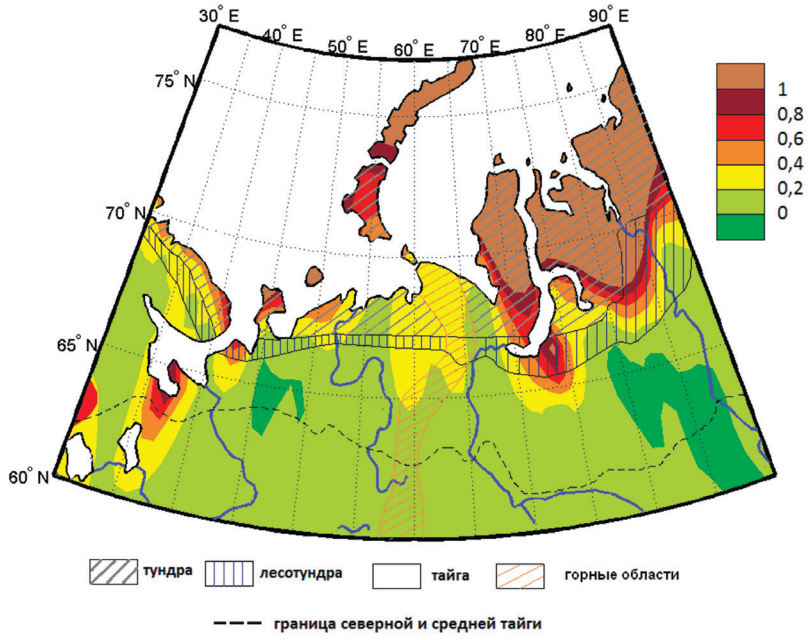

Рис. 2. Индекс уровня воздействия изменения климата на природные экосистемы

Изменение отражательных свойств поверхности (NDVI, альбедо)

Попытаемся оценить отклик растительности на изменение климатических условий по спутниковым данным. Для этого мы выделили участки с однонаправленными тенденциями отражательной способности подстилающей поверхности. Рассмотрим ландшафты, где влияние климатических изменений на экосистемы достигло значительного уровня.

На Европейской части России в отдельных районах тундры и лесотундры наблюдается значимое увеличении вегетационного индекса. Коэффициент линейного тренда NDVI на отдельных участках тундры Кольского полуострова и в узкой полосе Малоземельской тундры варьирует от 0,02 до 0,06 (*рис. 3*). При этом на большей части тундры наблюдается значимый положительный тренд альбедо (выше 0,2 за 14 лет). Как было показано в литературе (Замолодчиков, 2011; Второй оценочный доклад…, 2014), это может свидетельствовать о возможности появления новых видов растений, ранее не встречавшихся на данной территории. В результате новые биомы отличаются оптическими свойствами (альбедо) (*рис. 4*). Например, в работе (Замолодчиков, 2011) отмечено, что в восточно-европейских тундрах наблюдается активный рост кустарниковой растительности, в особенности – ив, и увеличение берез, что может приводить к положительному тренду альбедо.

В районе южной границы Большеземельской тундры на картах прослеживаются значимые положительные тренды NDVI и отрицательный тренд альбедо, что характерно при увеличении лесистости (Раунер, 1972). В работе (Замолодчиков, 2011) в этом районе также отмечается расширение границы лесов к северу.

На Европейской части России, необходимо отметить изменения, происходящие на границе северной и южной тайги. Изменение климатических условий здесь менее значительны,

но откликом растительности на улучшение климатических условий в начале XXI века является положительный тренд NDVI за счет увеличения фотосинтетической активности. Значимый коэффициент линейного тренда NDVI за 2000–2013 гг. здесь от 0,02 до 0,1. Причем в 2006–2013 гг. произошло значительное увеличение вегетационного индекса (NDVI), по сравнению с 2000–2006 гг. (рисунок не приводится). Линейный тренд альбедо здесь в основном отрицательный, что может говорить об увеличении лесистости (Раунер, 1972).

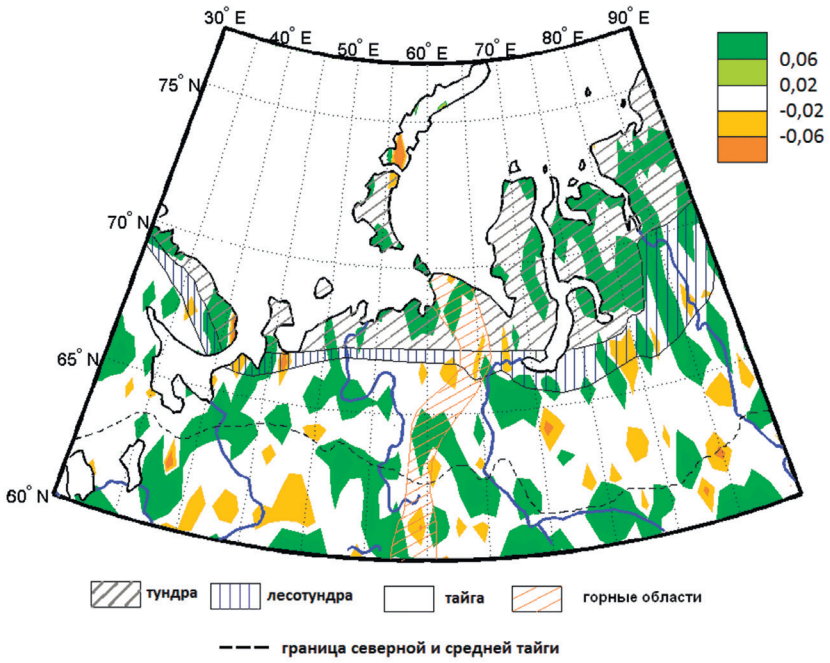

Рис. 3. Линейный тренд NDVI 2000–2013 гг. (интенсивность изменения NDVI год$^{-1}$). Значимые изменения выше или ниже ±0,02

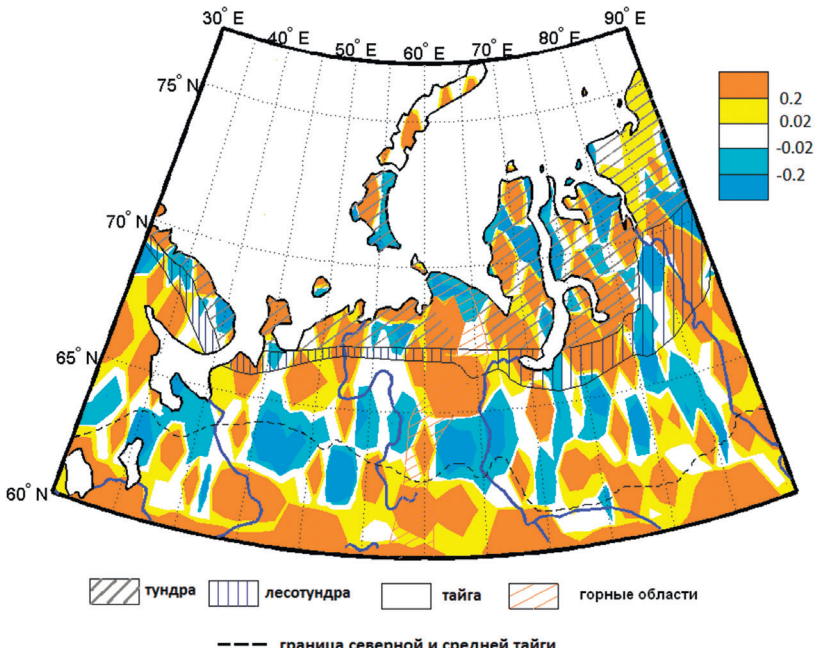

Рис. 4. Линейный тренд альбедо 2000–2013 гг. Значимые изменения выше ниже ±0,02 (интенсивность изменения альбедо год$^{-1}$)

Подтверждением этого факта служит карта изменения лесной растительности, разработанная Университетом штата Мэриленд по состоянию на 2013 г. по сравнению с 2000 г. (University of Maryland, 2014). На карте видно, что в этом районе превалирует увеличение лесов над их потерей.

В Западной Сибири в зоне тундры на болотистых участках и мохово-лишайниковых тундр на полуостровах Ямал и Гыданский отмечается положительный значимый тренд вегетационного индекса от 0,02 до 0,06. Причем наибольшее увеличение NDVI происходило в начале периода (2000–2006 гг.), а во второй половине периода (2007–2013 гг.) значения NDVI практически не менялись (рисунок не приводится). Разнонаправленные значимые тренды альбедо в тундрах Ямала и Гыданского полуостровов, где области с положительным трендом альбедо соседствуют с отрицательными, свидетельствуют о возможном увеличении биомассы и фотосинтетической активности.

Можно отметить увеличение NDVI и уменьшение альбедо в западной части центрального Ямала. В работе (Хитун и др., 2011) отмечено, что в этом районе происходит увеличение продуктивности почв на песчаных и суглинистых площадках и, соответственно, увеличение биомассы растительности за счет роста задернованности, при этом наблюдается исчезновение ерника.

В тундрах восточнее полуострова Таймыр положительный тренд NDVI сохраняется в течение всего 14 летнего периода, а изменение альбедо положительно.

В зоне лесотундры Западной Сибири в районе Обской губы наблюдается положительный тренд NDVI и отрицательный тренд альбедо, что, как и на Европейской части, может говорить об увеличении лесистости (Раунер, 1972) и вероятности сдвига в этом районе лесотундровой зоны к северу.

На прилегающих ландшафтах северной тайги на Полуйской возвышенности в верхнем течении Оби климатические изменения не столь значительны, но здесь наблюдается значительный линейный тренд NDVI – выше 0,1 за 14 лет, сопровождающийся положительным трендом альбедо. По оценкам (Замолодчиков, 2011), в этом районе при положительной динамике теплообеспеченности произошло увеличение березы больше, чем на 25%.

Выводы

В начале XXI века на Европейской части России и в Западной Сибири для субарктических и бореальных ландшафтов максимальное увеличение индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы наблюдалось в зоне тундр и лесотундр. На Европейской части изменения произошли главным образом за счет увеличения теплообеспеченности и более раннего начала вегетации. В Западной Сибири отмечалось суммарное воздействие увеличения теплообеспеченности и уменьшения влагообеспеченности. В результате в тундровой и лесотундровой зоне возникли благоприятные условия для изменения в растительности ландшафтов.

Оценка отклика растительности на изменение климатических условий по спутниковым данным показывает, что в тундре увеличение вегетационного индекса может сопровождаться разнонаправленным трендом альбедо на соседних участках. Это говорит не только об увеличении биомассы, но и о возможном появлении видов, ранее не встречавшихся на данной территории. Таким образом, уровень воздействия изменения климата на растительность тундр, главным образом в Западной Сибири, следует считать критическим, поскольку из-за гистерезиса для возврата в прежнее состояние недостаточно вернуть климатические характеристики к их исходным значениям. Определение превалирующих изменений в конкретном биоме зоны тундры и лесотундры требует дополнительного исследования с использованием данных высокого разрешения.

На границе средней и северной тайги как на Европейской части, так и в Западной Сибири, при достаточно низких значениях индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы, отмечается увеличение лесистости этой переходной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00031).

Литература

1. Архив ВНИИГМИ-МЦД, http://www.meteo.ru
2. *Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А.* Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 31−41.
3. *Величко А.А., Борисова О.К., Зеликсон Э.М., Морозова Т.Д.* К оценке изменений в состоянии растительного и почвенного покровов Восточно-Европейской равнины в XXI веке вследствие антропогенного изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. Т. XVIII. С. 208–220.
4. *Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 162-172.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.1009 с.
6. *Замолодчиков Д.Г.* Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учета лесного фонда. // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
7. *Зеликсон Э.М., Борисова О.К., Величко А.А.* Растительный покров // Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления: ретроспективный анализ и сценарии. Под ред. А.А. Величко, М.: Геос, 2010. Глава 8. С. 110–119.
8. *Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Виноградова В.В.* Лесотундра на равнинах России по спутниковым данным // Известия РАН. Сер. геогр. 2005. № 4. С. 67–74.
9. *Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколихина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н.* Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
10. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 512 с.
11. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. Т. II. 288 с.
12. *Раунер Ю.Л.* Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 210 с.
13. *Хитун О.В., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г., Орехов П.Т., Уолкер Д.А., Фрост Д.Д., Хомутов А.В., Эпштейн Х.Е.* Зональные изменения некоторых параметров растительного покрова в западносибирской Арктике // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (20–24 сентября, 2011 г.). СПб, 2011. Т. 1. С. 429–432.
14. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири. Под ред. Н.С. Касимова, А.В. Кислова. М.: МАКС Пресс, 2011. 496 с.
15. Climate Change and Biodiversity. Ed. H. Gitay, A. Suarez, R.T. Watson, D.J. Dokken. 2002. http://www.ipcc.ch/pub/tpbiodiv.pdf. 86 p.
16. *Forbes B.C., Fauria M.M., Zetterberg P.* Russian Arctic warming and “greening” are closely tracked by tundra shrub willows // Global Change Biology. 2010. No. 16. P. 1542–1554.
17. *Gonsalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J.* Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change // Global Ecology and Biogeography. 2010. No. 19. P. 755–768.
18. University of Maryland, 2014, http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest.

The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century

T.B. Titkova, V.V. Vinogradova

Institute of Geography RAS
Moscow 119017, Russia
E-mail: ttitkova@yandex.ru

In the article, the impact of climate change on natural ecosystems in the northern landscapes of Russia is estimated. The research is based on the idea that a biome condition is determined mostly by warmth supply during vegetative period, winter severity and hydro-thermic factor. In the beginning of the XXI century, the maximal growth of indexes of climate change impact on natural ecosystems in the European part of Russia and Western Siberia is observed in tundra and forest-tundra zones. In the European part of Russia, changes are the consequence of warmth supply growth during summer and winter periods and earlier start of vegetation period. In Western Siberia, the cumulative impact on natural ecosystems is connected with warmth supply growth and moisture supply decrease. Vegetation response to climate conditions changes is evaluated from satellite data analysis. Vegetation index increase in the tundra zone, which is the result of biomass growth and photosynthesis activity, can be accompanied with albedo multidirectional trends in neighboring territories. This tendency may be the evidence of probable biomes loss of continuity in case of competition with allogenic vegetation species.

Keywords: climate change, heat supply, moisture content, natural ecosystems, NDVI, albedo

References

1. Arkhiv VNIIGMI-MTSD (Archive), http://www.meteo.ru
2. Anisimov O.A., Zhil'tsova E.L., Reneva S.A. Otsenka kriticheskikh urovnei vozdeistviya izmeneniya klimata na prirodnye ekosistemy sushi na territorii Rossii (Evaluation of critical levels of climate change impacts on natural terrestrial ecosystems in Russia), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, No. 11, pp. 31−41.
3. Velichko A.A., Borisova O.K., Zelikson E.M., Morozova T.D. K otsenke izmenenii v sostoyanii rastitel'nogo I pochvennogo pokrovov Vostochno-Evropiiskoi ravniny v XXI veke vsledstvie antropogennogo izmeneniya klimata (Estimation of changes in the vegetation and soil cover of the East European Plain in the twenty-first century due to anthropogenic climate change), *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2002, Vol. XVIII, pp. 208–220.
4. Vinogradova V.V., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Dinamika uvlazhneniya i teploobespechennosti v perekhodnykh landshaftnukh zonakh po sputnikovym i meteorologicheskim dannym v nachale XXI veka (Dynamics of moisture and heat fluxes in the transition landscape zones from satellite and meteorological data at the beginning of the XXI century), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 162-172.
5. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report Hydromet about climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1009 p.
6. Zelikson E.M., Borisova O.K., Velichko A.A. Rastitel'nyi pokrov (Vegetation cover), *Klimaty i landshafty Severnoi Evrazii v usloviyakh global'nogo potepleniya: retrospektivnyi analiz i stsenarii*, Moscow: Geos, 2010, pp. 110–119.
7. Zamolodchikov D.G. Otsenka klimatogennykh izmenenii raznoobraziya drevesnykh porod po dannym lesnogo fonda (Evaluation of changes in climatogenic diversity of tree species according to the forest fund data), *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2011, Vol. 131, No. 4, pp. 382–392.
8. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Vinogradova V.V. Lesotundra na ravninakh Rossii po sputnikovym dannym (Forest-tundra on Russian plains by satellite data), *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya,* 2005, No. 4, pp. 67–74.
9. Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toporov P.A., Chernyshev A.V., Chumachenko A.N. *Prognoz klimatichaskoi pesursoobespechnnosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya* (Forecast of climate resource supply of the East European Plain in conditions of warming of the XXI century), Moscow: MAKS Press, 2008, 292 p.
10. *Metody otsenki posledstvii izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system* (Methods for assessing climate change impacts on physical and biological systems), Ed. Semenov S.M., Moscow: Rosgidromet, 2012, 512 p.
11. *Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Assessment Report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2008, Vol. II, 288 p.
12. Rauner Yu.L. *Teplovoi balans rastitel'nogo pokrova* (Heat balance of vegetation cover), Leningrad: Rosgidromet, 1972, 210 p.
13. Khitun O.V., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Orekhov P.T., Uolker D.A., Frost D.D., Khomutov A.V., Epshtein Kh. E. Zonalnye izmeneniya ytkotorykh parametrov rastitelnogo pokrova v zapadnosibirskoi Arktike (Zonal

change of some parameters of the vegetation cover in West Siberian Arctic), *Otechestvennaya geobotanika: osnovnye vekhi i perspektivy* (National geobotanics: milestones and prospects), Saint Petersburg, 20-24 September 2011, Proc. conf., Vol. 1, pp. 429–432.
14. *Ekologo-geograficheskie posledstviya global'nogo potepleniya klimata XXI veka na Vostochno-Evropeiskoi ravnine i v Zapadnoi Sibiri* (Ecological and geographical implications of global warming of the XXI century in the East European Plain and Western Siberia), Eds. Kasimov N.S. and Kislov A.V. Moscow: MAKS Press, 2011, 496 p.
15. *Climate Change and Biodiversity*, Eds. H. Gitay, A. Suarez, R.T. Watson, D.J. Dokken, 2002, http://www.ipcc.ch/pub/tpbiodiv.pdf.
16. Forbes B.C., Fauria M.M., Zetterberg P. Russian Arctic warming and "greening" are closely tracked by tundra shrub willows, *Global Change Biology*, 2010, No. 16, pp. 1542–1554.
17. Gonsalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change, *Global Ecology and Biogeography*, 2010, No. 19, pp. 755–768.
18. University of Maryland, 2014, http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest.