

Е.Л. Жильцова¹, О.А. Анисимов²

ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПРОГНОЗ НА 21 ВЕК

VEGETATION DYNAMICS IN NORTH EURASIA: ANALYSIS OF OBSERVATIONS AND PROJECTION FOR THE 21ST CENTURY

Был произведен анализ современных изменений продуктивности биомов для европейского, западно-сибирского, восточно-сибирского и дальневосточного секторов российской Арктики. В анализе использовались данные спутниковых наблюдений NDVI за 1982-2012 гг., интерпретация которых проводилась при помощи разработанной ранее эмпирико-статистической модели природно-климатической зональности. Был выполнен многофакторный статистический анализ связи биопродуктивности арктических природных зон с климатическими индексами-предикторами, характеризующими температурный режим и условия увлажнения. Совокупность построенных по его результатам регрессионных уравнений для спектра биомов от северной тундры до средней тайги составила эмпирико-статистическую модель продуктивности, по которой были проведены прогнозные расчеты с использованием оптимальной для России ансамблевой климатической проекции. Согласно полученным результатам, наблюдаемое во всех арктических зонах увеличение продуктивности продолжится и в последующие десятилетия. К середине XXI века продуктивность в отдельных арктических биомах может увеличиться до 30 % от ее современной величины.

Ключевые слова: растительность, биомы, природные зоны, биопродуктивность, NDVI, моделирование, изменение климата, Арктика, Северная Евразия.

The modern changes in biome productivity in the Eurasian, West Siberian, East Siberian and Far Eastern sectors of the Russian Arctic have been analyzed using satellite data on NDVI for the period 1982-2012, supplemented by results from the statistical model of biome distribution. We used multifactorial statistical analysis to explore the links between the productivity of the Arctic biomes and climatic predictive indexes that characterize the temperature regime and moisture conditions. Resulting regression equations for the range of biomes from northern tundra to middle taiga were combined into the statistical model of bioproductivity. The model was used in conjunction with the optimal climate projection to give insight into the future

¹ Жильцова Елена Львовна – научный сотрудник Государственного гидрологического института, кандидат географических наук, г. Санкт-Петербург. E-mail: el-spb@mail.ru

Zhil'cova E.L. – Researcher State Hydrological Institute, Candidate of Geographical Sciences, Saint-Petersburg.

² Анисимов Олег Александрович – заведующий отделом исследований изменений климата Государственного гидрологического института, доктор географических наук, г. Санкт-Петербург. E-mail: oleg@oa7661.spb.edu

Anisimov O.A. – Head of department of climate change research, State Hydrological Institute, Doctor of Geographical Sciences, Saint-Petersburg.

changes of biome productivity. According to the model results, the current positive trends in productivity will continue in the following decades. By mid-21st century productivity of selected biomes may increase up to 30 %.

Keywords: *vegetation, biomes, natural zones, biological productivity, NDVI, modeling, climate change, the Arctic, Northern Eurasia.*

Введение

В настоящее время большой интерес представляет вопрос о том, как современные и будущие изменения климата повлияют на растительность арктической области, где в последние десятилетия произошли существенные изменения температурного режима. Эти изменения могут затрагивать как границы природных зон, так и продуктивность растительного покрова.

Продуктивность растительности является фундаментальной характеристикой экосистем, определяющей их роль в глобальном углеродном цикле. Данные прямых измерений биопродуктивности довольно немногочисленны, в первую очередь из-за трудоемкости оценки растительной биомассы природных экосистем. С развитием методов спутниковых наблюдений и повышением доступности их данных стали интенсивно развиваться методы количественной оценки сезонной биомассы и ее динамики, основанные на анализе дистанционно измеряемых оптических характеристик. Наиболее распространенным среди них является индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Это показатель количества фотосинтетически активной биомассы, который представляет собой нормированную разность альбедо подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Во многих работах была показана репрезентативность NDVI для оценки сезонной продуктивности и фотосинтетической активности северных экосистем, а также обоснована эффективность его использования для мониторинга динамики растительного покрова как на ландшафтном, так и на биомном уровнях [12, 19]. Таким образом, NDVI является универсальным индикатором как сезонной, так и многолетней динамики продуктивности растительности.

Предметом данной статьи является обобщение имеющихся данных прямых наблюдений за динамикой растительности; анализ имеющихся спутниковых данных NDVI для арктической зоны России с целью выявления долговременных трендов и установления их связи с климатическими параметрами; построение на основе полученных закономерностей эмпирико-статистической модели продуктивности арктических биомов и прогноз динамики их продуктивности на середину 21-го века.

Современная динамика растительности Северной Евразии по данным наблюдений

Данные прямых наблюдений современной динамике растительности Северной Евразии немногочисленны и фрагментарны. В работе [8] отмечены свидетельства изменения древесно-кустарниковой растительности в ряде районов вблизи северной границы распространения леса. Зарубежные исследования также отмечают изменения границ ареалов северной растительности и состава отдельных биомов. При этом наибольшим изменениям подвергаются самые северные биомы. Так, по данным наблюдений на биостанции Toolik Lake на Аляске в период с 1981 по 2008 гг., доля

сосудистых растений выросла на 18 % при увеличении общей биомассы и высоты растительности [16]. Дендрологические исследования свидетельствуют о том, что на протяжении 20-го века в северной части сибирской тайги рост деревьев хорошо коррелировал с повышением летних температур. В отдельных регионах были выявлены очень существенные изменения, например, увеличение на 600 % площади березовых лесов в северной Швеции в период 1977-2010 гг. [20] или удвоение биомассы деревьев в северной Норвегии с 1957 года [23]. В канадской Арктике за последние тридцать лет заметно сократилась площадь полярных пустынь. На Кольском полуострове за этот же период зафиксировано смещение к северу границ тундры и лесотундры, продвижение лесотундровой растительности вверх по склонам, замещение лишайниковой и кустарничково-лишайниковой тундры лишайниково-кустарничковой и кустарничковой, зарастание болот древесно-кустарниковой растительностью [10]. Вместе с тем, лишь около половины из имеющихся в циркумполярной Арктике пунктов наблюдений выявили продвижение к северу границы леса за последние 100 лет. В некоторых районах, в том числе и в российской Арктике, линия леса даже отступила [15], что отчасти могло быть обусловлено вырубкой деревьев.

Опубликованные данные об изменениях продуктивности арктической растительности также дают неоднозначную картину. В ряде арктических и субарктических регионов (Таймыр, Новая Земля, Канадский Арктический архипелаг и др.) не только не зарегистрировано повышения продуктивности, но местами отмечено ее снижение. В то же время для тундры и северобореальных (в основном лиственничных) сибирских лесов характерен положительный тренд. На юге тундровой зоны и в северобореальных (в основном лиственничных) сибирских лесах происходит увеличение сезонной биомассы преимущественно вследствие повышения роли кустарников и кустарничков как за счет увеличения запасов зеленой фитомассы, так и вследствие расширения площадей более продуктивных сообществ, таких как ивняки и ольховники [5, 17]. Реже отмечается увеличение биомассы травянистых растений [11]. На севере тундровой зоны (полярные пустыни и арктические тундры) повышения фотосинтетической активности не наблюдается.

Эмпирико-статистическая модель природной зональности России

Для оценки смещения границ природно-климатических зон (биомов), обусловленного происходящими в настоящее время изменениями климата, нами была разработана эмпирико-статистическая модель природной зональности [1, 6]. Не повторяя этих работ, отметим лишь основные черты этой модели. Главным ее отличием от аналогов является улучшенная дифференциация арктической растительности. В модели рассматриваются 15 основных биомов, встречающихся на территории России, из которых 11 частично или полностью относятся к арктической зоне: 1 – полярная пустыня и арктическая (лишайниковая) тундра, 2 – граминоидная тундра, 3 – кустарничковая тундра, 4 – кустарниковая тундра, 5 – лесотундра, 6 – северная тайга, 7 – средняя тайга, 8 – южная тайга, 9 – смешанный лес, 10 – широколиственный лес, 11 – степь, 12 – полупустыня, 13 – альпийская тундра, 14 – субгольцевые редколесья, 15 – горная тайга. Для определения граничных значений диапазона климатических параметров в каждой из 15 зон растительности был использован метод ординации в пространстве трех климатических индексов – предикторов:

- сумма температур выше 5°C – характеризует температурный режим вегетационного периода, а также неявно учитывает мощность сезонно-талого слоя многолетне-мерзлых грунтов, которая, в первом приближении, связана квадратичной зависимостью с суммой летних температур;

- сумма температур ниже 0°C – характеризует суровость зим и является важным лимитирующим фактором для растительности в условиях континентального климата;

- индекс сухости, равный отношению суммы температур выше 5°C к годовому количеству осадков.

Для построения эмпирико-статистической модели использовалась карта растительной зональности, полученная совмещением и генерализацией до уровня 15 биомов двух цифровых карт растительности из «Атласа земельных ресурсов России» [21] и карты растительности циркумполярного региона [14]. Ординация, т.е. определение минимального и максимального значений трех индексов-предикторов для каждой из 15 растительных зон, проводилась на основе данных метеорологического архива CRU-3.21 (Tyndall Centre for Climate Change Research, UK), представляющего собой результат интерполяции наблюдений мировой метеорологической сети в узлы регулярной сетки с разрешением $0,5^{\circ}$ по широте и долготе за период 1901-2012 гг. Ранее нами было показано, что для нескольких последних десятилетий этот архив воспроизводит поля температуры воздуха и осадков на территории стран бывшего СССР с относительно небольшой погрешностью [6]. Более подробно особенности архива рассмотрены в статье [9] в данном сборнике. Ординация проводилась отдельно для четырех секторов: европейской части России (до 60° в.д.), Западной Сибири (до 90° в.д.), Восточной Сибири (до 130° в.д.) и Дальнего Востока. Это было сделано для того, чтобы максимально полно учесть физиологическую адаптацию растений к местным условиям. В работе [22] было показано, что из-за большой широтной протяженности территории России и многообразия форм рельефа, адаптация приводит к значительным различиям климатических границ и оптических свойств одних и тех же видов, произрастающих в разных секторах.

На рисунке 1 показаны исходная и рассчитанная по модели для современных условий карты растительности, полученная совмещением результатов по каждому из рассматриваемых четырех секторов.

По модели природной зональности были проведены прогностические расчеты на середину 21 века. В расчетах использовалась оптимизированная для территории России ансамблевая климатическая проекция, объединяющая результаты 26 лучших моделей CMIP5 для наиболее «агрессивного» сценария эмиссии парниковых газов RCP-8.5 [2, 9]. На рис. 2а показаны прогнозируемые на период 2031-2060 гг. изменения границ биомов. В этот интервал времени, согласно ансамблевой проекции, величина глобального потепления достигнет приблизительно 2°C по отношению к доиндустриальному периоду. Этот уровень представляет особый интерес в связи с тем, что страны Евросоюза в качестве главной задачи своей политики в области смягчения воздействия на климат рассматривают ограничение глобального потепления именно этой величиной.

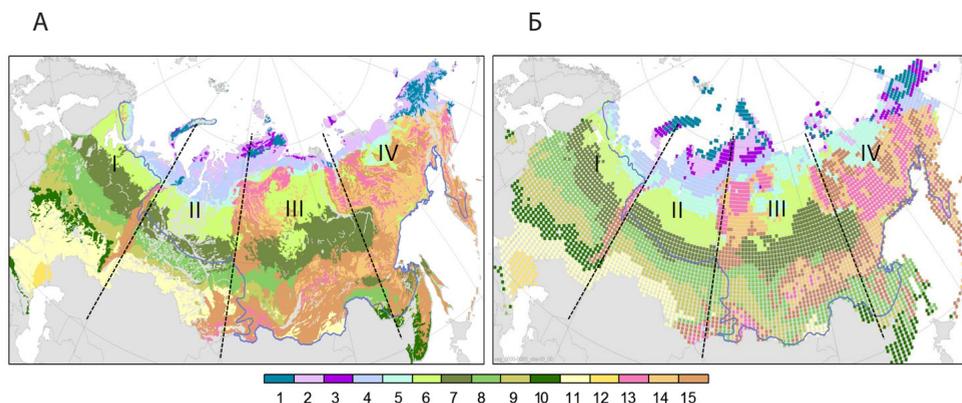


Рис. 1. Современная карта природных зон России (А) и воспроизведенные при помощи модели границы зон (Б).

Обозначения биомов: 1 – полярная пустыня и арктическая (лишайниковая) тундра, 2 – граминоидная тундра, 3 – кустарничковая тундра, 4 – кустарниковая тундра, 5 – лесотундра, 6 – северная тайга, 7 – средняя тайга, 8 – южная тайга, 9 – смешанный лес, 10 – широколиственный лес, 11 – степь, 12 – полупустыня, 13 – альпийская тундра, 14 – субгольцевые редколесья, 15 – горная тайга

На рис. 2б цветом выделены только те территории, где в результате рассматриваемого климатического воздействия ожидается смена биомов. Климатическое воздействие, в результате которого происходит не только изменение продуктивности, но и смена биомов, сопряжено с экологическими рисками. Мерой таких рисков может служить отношение площади, на которой прогнозируется смена биомов, ко всей территории рассматриваемого региона. Соответствующие данные расчетов приведены в таблице 1, где также приведены результаты, полученные для периода 2016-2045 гг.

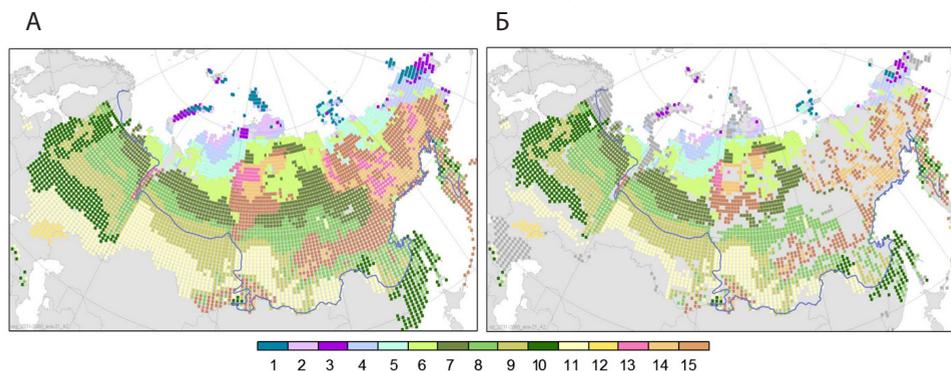


Рис. 2. А – прогноз растительной зональности для 2031-2060 гг. Б – территории, на которых прогнозируется смена биомов.

Цветом показаны новые биомы, замещающие ранее существовавшие на данной территории. Условные обозначения см. рис. 1

**Доля территории в различных секторах России, на которой прогнозируется
смена биомов в первой четверти и в середине 21 века**

Период	ЕТР	Зап. Сибирь	Вост. Сибирь	Д. Восток	РФ
2016-2045 гг.	58	64	55	48	56
2031-2060 гг.	71	74	70	57	67

Можно видеть, что к середине столетия климатообусловленные изменения биомов могут охватить большую часть равнинной территории России. В горных областях прогнозируемые изменения заметно меньше, возможно, за счет недостаточно адекватного отражения в модели высотной поясности. Вместе с тем, полученная оценка возможных изменений границ растительных зон является весьма условной, поскольку модель отражает только лишь эмпирико-статистическую связь природной зональности и климата и не учитывает инерционность биомов, их адаптивные свойства и другие важные биологические и почвенные факторы. Более реалистичны рассматриваемые далее оценки климатозависимой динамики продуктивности биомов вне зависимости от изменения или постоянства их границ.

Эмпирико-статистическая модель продуктивности растительности

Для построения эмпирико-статистической модели продуктивности растительности были использованы данные спутниковых измерений NOAA за период 1982-2012 гг. Этот выбор во многом обусловлен тем, данные имеются в открытом доступе на сайте http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_ftp.php. Еще одним достоинством является то, что они получены с помощью AVHRR-радиометров высокого разрешения и имеют пространственную детализацию 4, 7 и 16 км при временной периодичности 1 неделя.

Анализ данных NDVI выполнялся дифференцированно по территориальным секторам и биомам согласно карте, представленной на рисунке 1. Исключением явилось то, что из-за слишком большой фрагментарности мохово-лишайниковая, кустарничковая и граминоидная тундра были объединены в одну зону северной тундры. В качестве кумулятивной метрики продуктивности использовалось среднее за вегетационный период значение NDVI. Ежегодная продолжительность вегетационного периода со среднесуточными температурами выше 5°C рассчитывалась по данным метеоархива CRU-3.1 с разрешением 0,5° по широте и долготе [9].

На рисунке 3 показана динамика NDVI для биомов, встречающихся в каждом из четырех секторов российской Арктики. Был проведен парный и многофакторный корреляционный анализ рядов NDVI и нескольких климатических характеристик теплообеспеченности и увлажнения, и на основе полученных результатов построена эмпирико-статистическая модель продуктивности. Подробное описание алгоритма построения модели и ее валидации дано в работе [3]. Анализ показал, что наилучшим и в большинстве случаев достаточным климатическим индексом-предиктором

для расчета продуктивности арктической растительности является сумма вегетационных температур (ΣT_{5+}). Во всех растительных зонах и секторах, за исключением горных субгольцевых редколесий юга Западной Сибири, в 1982-2012 гг. тренды NDVI были положительными и в большинстве случаев статистически значимыми на уровне 95 %. Эти результаты подтверждают, что при относительно невысоких летних температурах увеличение теплообеспеченности ведет к увеличению продуктивности. Корреляции же с суммами осадков, напротив, как правило, отрицательные (исключая горные области дальневосточного сектора) и весьма низкие, кроме Западной Сибири, что также закономерно, поскольку на подавляющей части арктической территории увлажнение не только не является лимитирующим фактором, но местами бывает избыточным, в особенности на заболоченной Западно-Сибирской низменности. Основные результаты модельных расчетов приведены в таблице 2.

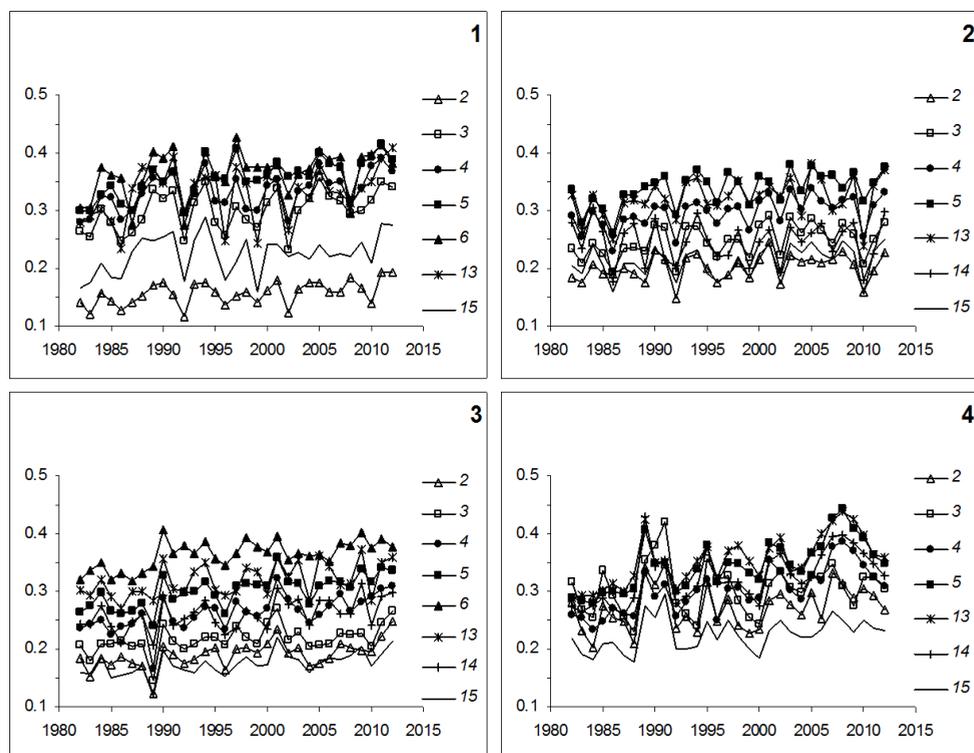


Рис. 3. Изменение NDVI в четырех секторах Российской Арктики

(1 – Европейская часть, 2 – Западная Сибирь, 3 – Восточная Сибирь, 4 – Дальний Восток).

Обозначения биомов: 2 – северная тундра, 3 – южная тундра, 4 – лесотундра, 5 – северная тайга, 6 – средняя тайга, 13 – горная тайга, 14 – субгольцевые редколесья, 15 – альпийская тундра

Таблица 2

Тренды NDVI и коэффициенты корреляции среднезональных значений NDVI с суммами температур вегетационного периода (ΣT_{5+}) и суммами летних осадков (ΣR) за период 1982-2012 гг. (Все тренды, кроме значений, выделенных курсивом, статистически значимы на 95 % уровне)

Зона	Европейская часть России			Западная Сибирь			Восточная Сибирь			Дальний Восток		
	Тренд (% за 10 лет)	Коэф. корр.		Тренд (% за 10 лет)	Коэф. корр.		Тренд (% за 10 лет)			Тренд (% за 10 лет)	Коэф. корр.	
		ΣT_{5+}	ΣR		ΣT_{5+}	ΣR		ΣT_{5+}	ΣR		ΣT_{5+}	ΣR
2	7	0.78	-0.16	3.5	0.66	-0.55	7.9	0.73	-0.29	4.8	0.70	-0.04
3	5.7	0.70	-0.09	5.2	0.78	-0.54	5.5	0.68	-0.37	2	0.54	-0.15
4	5.4	0.64	-0.09	5.1	0.77	-0.36	8	0.81	-0.07	10.9	0.65	0.05
5	7	0.50	-0.23	4.7	0.69	-0.33	7	0.74	0.04	9.9	0.62	0.17
6	4.7	0.39	-0.10	-	-	-	4.7	0.42	-0.08	-	-	-
13	5.1	0.80	-0.19	3.4	0.64	-0.42	4.7	0.66	-0.37	9	0.59	0.37
14	-	-	-	-0.4	0.57	-0.60	5.8	0.74	-0.30	8.6	0.64	0.20
15	5.8	0.64	-0.06	4.2	0.86	-0.44	6.9	0.82	-0.31	4.9	0.72	-0.12

Как и в случае с растительной зональностью, по модели продуктивности были проведены прогностические расчеты на середину 21-го века с использованием оптимальной ансамблевой климатической проекции для сценария RCP-8.5. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Прогнозируемые значения NDVI на период 2035-2065 гг. и их изменения по отношению к базовому периоду 1982-2012 гг.

Зона	Европейская часть России		Западная Сибирь		Восточная Сибирь		Дальний Восток	
	NDVI	Δ NDVI, %	NDVI	Δ NDVI, %	NDVI	Δ NDVI, %	NDVI	Δ NDVI, %
2	0.205	30.6	0.256	27.4	0.239	25.8	0.367	34.9
3	0.362	20.7	0.315	27.0	0.261	20.3	0.411	34.8
4	0.386	15.9	0.354	19.6	0.327	24.3	0.388	28.5
5	0.400	12.4	0.393	16.3	0.358	18.9	0.431	24.9
13	0.426	28.7	0.385	19.6	0.378	18.5	0.429	21.2
14	-	-	0.294	19.5	0.316	21.5	0.405	24.2
15	0.290	28.9	0.281	32.5	0.220	26.4	0.306	36.0

Анализ приведенных данных показывает, что при повсеместном увеличении продуктивности арктической растительности в современный период наибольшие тренды имеют место в дальневосточном секторе для бореальных биомов – 9-11 %

за 10 лет. В остальных секторах тренды имеют заметно меньшую величину. В дальневосточных биомах с максимальными трендами продуктивности ее корреляции с суммами температур вегетационного периода несколько ниже, чем в других секторах, притом, что корреляция с осадками низкая, но положительная. Показательно, что в этих регионах рост летней температуры не превышал средней по всей Арктике величины и составлял $0,2 - 0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет, что меньше, чем в европейском и восточно-сибирском секторах, где он достигал значений $0,3 - 0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет [4]. В климатическом отношении этот регион отличается от остальных секторов Арктики тем, что на его южную периферию оказывает воздействие муссонная циркуляция, изменения которой и могут быть главным фактором, вызвавшим отмеченное относительно большое увеличение продуктивности. Довольно высокие тренды продуктивности имеют место повсеместно в Европейской части Арктической зоны России, что, по-видимому, в наибольшей степени обусловлено температурным фактором, который также определяет и относительно небольшие современные изменения продуктивности в сибирских секторах.

Перспективные оценки продуктивности, полученные по модели с использованием ансамблевой климатической проекции, указывают на то, что многие из выявленных современных пространственных закономерностей сохранятся и в будущем притом, что может произойти перераспределение темпов роста между различными растительными зонами. Так, в дальневосточном секторе по-прежнему ожидаются наибольшие темпы роста продуктивности, однако в отличие от современной ситуации, они будут достигаться, прежде всего, за счет тундры и лесотундры. Участки альпийской тундры в дальневосточном секторе также имеют большие положительные тренды NDVI, связанные, вероятно, с увеличением сезонной продуктивности кустарников и кустарничков. Показательно, что рост продуктивности кустарников и кустарничков на тундровых и северотаежных территориях Аляски также наблюдается в первую очередь в предгорных и горных районах.

Заключение

Разработанные эмпирико-статистические модели растительной зональности и продуктивности биомов и полученные с их помощью результаты позволили построить цельную картину современных и ожидаемых до середины 21-го века изменений растительности в арктической зоне России, которая хорошо согласуется с данными наблюдений.

Прогнозируемое увеличение продуктивности арктической растительности является важным фактором, стабилизирующим углеродный баланс в Арктике. Согласно имеющимся оценкам [17], в последние десятилетия наземные арктические экосистемы в целом являлись слабым стоком атмосферного углерода с интенсивностью от $0,3$ до $0,6$ Пг (10^{15} г) С/год.. Обусловленное изменением климата увеличение температуры арктических почв и более глубокое сезонное оттаивание многолетнемерзлых грунтов приведут к усилению эмиссии углерода, прежде всего в форме углекислого газа. Увеличение продуктивности растительности может отчасти компенсировать этот механизм воздействия на климат, усиливающий парниковый эффект.

Представленный в данной работе метод оценки продуктивности имеет ряд известных ограничений, присущих всем регрессионным моделям. Наиболее существенным ограничением является негласно принятое в работе положение о фиксированных границах биомов при расчете климатообусловленных изменений продуктивности. Оно отчасти оправдано тем, что формирование ареалов основных растительных зон – длительный инерционный процесс, протекающий в условиях стационарного климата не одно десятилетие. Вместе с тем, как уже упоминалось вначале статьи, многими авторами отмечается смещение границ биомов под воздействием изменения климата и, в частности, сокращение площади арктической тундры. Эти процессы имеют место уже сейчас и, согласно модельным расчетам, продолжатся с нарастающей интенсивностью в 21-м веке.

В соответствии с современными представлениями, можно принять следующую концептуальную модель отклика растительности на изменение климата. До того, как климатическое воздействие достигнет некоторого критического уровня, отклик на него проявляется в увеличении биомассы и фотосинтетической активности растительности при сохранении целостности состава и неизменности ареала биома. На этом этапе вполне правомерно использовать для расчета биопродуктивности эмпирико-статистическое моделирование, подобное представленному выше. Когда же уровень воздействия превысит возможности адаптации растительной зоны, изменения приобретают принципиально иной характер: начинает происходить интродукция новых видов, замещение одних доминантов другими, биом теряет свою целостность и подвергается сукцессии. В итоге происходит смена старого биома новым, обладающим иными свойствами, в том числе оптическими, которые уже не могут быть описаны регрессионными уравнениями, полученными по данным NDVI для первоначального биома.

Необходимо учитывать также ограничения, связанные со скоростью миграции видов. Наблюдаемый в настоящее время рост фотосинтетической активности связан не столько с интродукцией новых видов, сколько с увеличением размеров, проективного покрытия и освоением новых местообитаний видами аборигенной флоры.

Подводя итог, можно отметить следующее. В результате климатообусловленной динамики границ природных зон в Арктике менее продуктивные биомы замещаются более продуктивными. Этот процесс не учитывался в приведенных нами расчетах, поскольку границы зон были фиксированы. Если же принять во внимание изменения границ, то полученные перспективные оценки биопродуктивности могут только увеличиться. Следовательно, представленные в статье результаты следует рассматривать как нижнюю оценку возможных климатообусловленных изменений продуктивности растительности Арктики.

Благодарности.

Данная работа поддерживается грантом Российского Научного Фонда (проект 14-17-00037). Авторы выражают признательность В.А. Кокореву за предоставленные данные оптимальной климатической проекции.

Литература

1. Анисимов, О.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, С.А.Ренева // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11. – С. 31-42.
2. Анисимов, О.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу / О.А. Анисимов, В.А. Кокорев // Лед и Снег. – 2013. – Т. 121. – № 1. – С. 83-92.
3. Анисимов, О.А. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, В.Ю. Разживин // Исследования Земли из Космоса. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – № 9. – С. 60-70.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. – Москва : Росгидромет, 2013. – 83 с.
5. Елсаков, В.В. Изменения растительного покрова российской субарктики в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий / В.В. Елсаков, Д.В. Кириллов, А.Б. Новаковский и др. // Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана. Материалы всероссийской конференции. – Сыктывкар : Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2013 (<http://ib.komisc.ru/add/conf/tundra>)
6. Жильцова, Е.Л. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами / Е.Л. Жильцова, О.А. Анисимов // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 10. – С. 79-89.
7. Жильцова, Е.Л. Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России / Е.Л. Жильцова, О.А. Анисимов // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. – Москва : Планета, 2013. – С. 360-374.
8. Замолодчиков, Д.Г. Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учетов лесного фонда / Д.Г. Замолодчиков // Успехи современной биологии. – 2011. – Т. 131. – № 4. – С. 382-392.
9. Кокорев, В.А. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России / В.А. Кокорев, А.Б. Шерстюков // Арктика XXI век. Естественные науки. – 2015. – № 2. – С. 5–23.
10. Кравцова, В.И. Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения / В.И. Кравцова, А.Р. Лошкарева // Вестник МГУ, сер. География. – 2010. – № 6. – С. 49-57.
11. Лавриненко, И.А. Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря / И.А. Лавриненко, О.В. Лавриненко // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – С. 4-16.
12. Beck, P.S.A., Goetz, S.J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences / P.S.A. Beck, S.J. Goetz // Environ. Res. Lett. – 2011. – Vol. 6. – No 045501. – P. 10.

13. Bonfils, C.J.W., Phillips, T.J., Lawrence, D.M., Cameron-Smith, P., Riley, W.J., Subin, Z.M. On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate / C.J.W. Bonfils, T.J. Phillips, D.M. Lawrence, P. Cameron-Smith, W.J. Riley, Z.M. Subin // *Environ. Res. Lett.* – 2012. – Vol. 7. – No 015503. – P. 9.
14. Circumpolar arctic vegetation map. (1:7,500,000 scale). – CAVM Team, 2003.
15. Cherosov, M.M., Isaev, A.P., Mironova, V.I., Lytkina, L.P., Gavriilyeva, L.D., Sofronov, R.R., Arzhakova, A.P., Barashkova, N.V., Ivanov, I.A., Shurduk, I.F., Efimova, A.P., Karpov, N.S., Timofeyev, P.A., Kuznetsova, L.V. Vegetation and human activity // *The Far North: Plant biodiversity and ecology of Yakutia*. Berlin: Springer, 2010. – P. 261-295.
16. Hudson, J.M.G., Henry, G.H.R. Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008 / J.M.G. Hudson, G.H.R. Henry // *Ecology*. – 2009. – No 90. – P. 2657-2663.
17. Loranty, M.M., Goetz, S.J. Shrub expansion and climate feedbacks in Arctic tundra / M.M. Loranty, S.J. Goetz // *Environ. Res. Lett.* – 2012. – Vol. 7. – No 011005.
18. McGuire, A.D., Anderson, L.G., Christensen, T.R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D.J., Heimann, M., Lorenson, T.D., Macdonald, R.W., Roulet, N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change / A.D. McGuire, L.G. Anderson, T.R. Christensen, S. Dallimore, L. Guo, D.J. Hayes, M. Heimann, T.D. Lorenson, R.W. Macdonald, N. Roulet // *Ecological Monographs*. – 2009. – Vol. 79. – No 4. – P. 523-555.
19. Reynolds, M.K., Walker, D.A., Epstein, H.E., Pinzon, J.E., Tucker, C.J. A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHR-NDVI / M.K. Reynolds, D.A. Walker, H.E. Epstein, J.E. Pinzon, C.J. Tucker // *Remote Sensing Letters*. – 2012. – Vol. 3. – No 5. – P. 403-411.
20. Rundqvist, S., Hedenas, H., Sandstrom, A., Emanuelsson, U., Eriksson, H., Jonasson, C., Callaghan, T.V. Tree and shrub expansion over the past 34 years at the tree-line near Abisko, Sweden / S. Rundqvist, H. Hedenas, A. Sandstrom, U. Emanuelsson, H. Eriksson, C. Jonasson, T.V. Callaghan // *Ambio*. – 2011. – Vol. 40. – No 6. – P. 683-692.
21. Stolbovoi, V., McCallum, I. CD-ROM land resources of Russia. – Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science, 2002.
22. Tchebakova, N.M., Rehfeldt, G.E., Parfenova, E.I. From vegetation zones to climatypes: Effects of climate warming on Siberian ecosystems // *Permafrost ecosystems: Siberian larch forests, ecological studies*. – Berlin : Springer Science+Business Media. – 2010. – P. 427-447.
23. Tommervik, H., Bjerke, J.W., Gaare, E., Johansen, B., Thannheiser, D. Rapid recovery of recently overexploited winter grazing pastures for reindeer in northern Norway / H. Tommervik, J.W. Bjerke, E. Gaare, B. Johansen, D. Thannheiser // *Fungal Ecology*. 2012. – Vol. 5. – No 1. – P. 3-15.